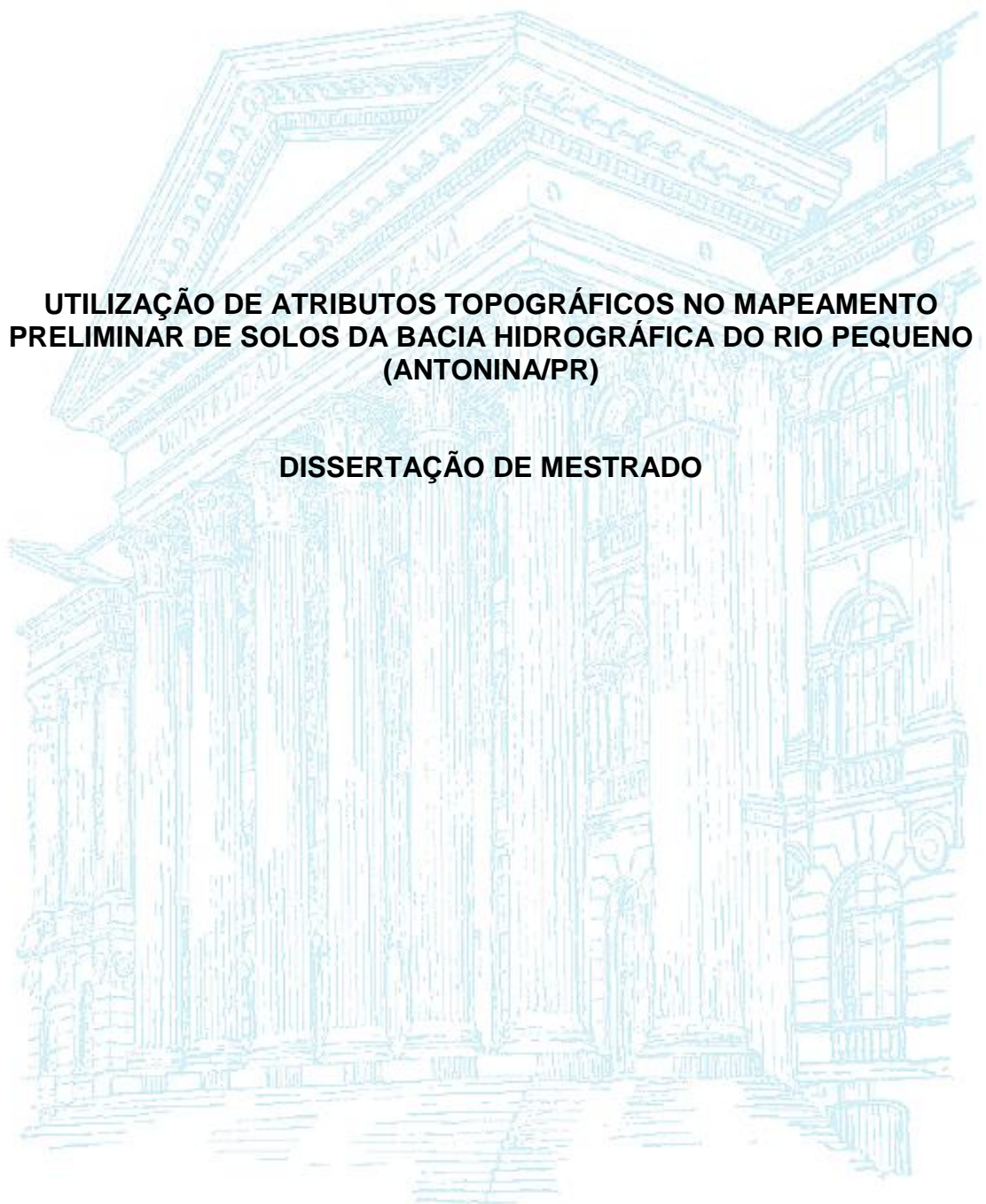


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ALEXEI NOWATZKI

**UTILIZAÇÃO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS NO MAPEAMENTO
PRELIMINAR DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO
(ANTONINA/PR)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



CURITIBA
2013

ALEXEI NOWATZKI

**UTILIZAÇÃO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS NO MAPEAMENTO
PRELIMINAR DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO
(ANTONINA/PR)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Curso de Mestrado, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia, Linha de Pesquisa Paisagem e Análise Ambiental.

Orientador: Leonardo José Cordeiro Santos

**CURITIBA
2013**

Nowatzki, Alexei

Utilização de atributos topográficos no mapeamento preliminar de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno (Antonina/Pr) / Alexei Nowatzki. – Curitiba, 2013.

113 f. : il.; graf., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Orientador: Leonardo José Cordeiro Santos

1. Mapeamento do solo. 2. Mapeamento digital. I. Santos, Leonardo José Cordeiro. II. Título.

CDD 526.98

MEC-UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
- MESTRADO E DOUTORADO



PARECER

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia reuniram-se para a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo (a) candidato (a) **ALEXEI NOWATZKI** intitulada "**A UTILIZAÇÃO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS NO MAPEAMENTO PRELIMINAR DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO (ANTONINA/PR)**", para obtenção do grau de Mestre em Geografia, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná Área de Concentração **Espaço, Sociedade e Ambiente**, Linha de Pesquisa **Paisagem e Análise Ambiental**.

Após haver analisado o referido trabalho e arguido o (a) candidato (a), são de parecer pela APROVAÇÃO da Dissertação.

Curitiba, 25 de março de 2013.

Nome e Assinatura da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos - Orientador

Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira – PPGeo/UFPR

Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares - UFPI

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a sociedade brasileira por financiar, através do pagamento de impostos, os meus estudos de Mestrado e pela bolsa CAPES que tornaram possível a realização deste trabalho.

A Universidade Federal do Paraná, ao departamento de Geografia e ao programa de Pós Graduação em Geografia.

Ao professor e amigo *Leonardo José Cordeiro Santos* pela confiança, paciência e a todos os ensinamentos referentes à Pedologia.

Ao professor *Claudinei Taborda da Silveira*, pela disposição em ajudar no entendimento dos parâmetros que envolvem a Pedometria.

Aos amigos do Mestrado: *Gustavo Olesko* pela amizade que se manteve dès da turma de graduação; *Anderson L. G. Belém* pela convivência no laboratório durante o mestrado e em especial a *Orestes Jarentchuk Jr.* que sempre se dispôs a ajudar, quando tive dúvidas de geoprocessamento.

Aos integrantes do Laboratório de Biogeografia e Solos (LABS), em especial a *Eduardo Vedor de Paula*, *Caroline Mangueira*, *Edivando Vitor Couto*, *Julio M. F. da Silva*, *Ana Paula M. Mikosik*, *Juliana Aurea Uber* e *Kael da Silva Petelak*.

A todos do Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG), em especial a *Gilson Bauer Schultz*, por contribuir nas discussões deste trabalho.

A *Márcio A. F. Grochocki* pela convivência durante trabalhos de levantamentos pedológicos pelo Paraná, na qual possibilitaram uma evolução no modo de pensar a classificação de solos.

A ONG Em Ação, em especial aos professores *Marcelo Guilherme* e *Emanuel Cochinski* e aos amigos *João Paulo da Costa Rosa* e *Pericles Marcondes*.

Aos amigos de longa data *Natanael Witt Antunes Cardoso* e *Julio Cezar Peripolli*.

A *Paola Caroline Nagamatsu*, pelo seu apoio em todos os momentos e pela sua agradável companhia.

Por fim, agradeço aos meus familiares todo o apoio e amor incondicional. Agradeço aos meus avós *Harry* e *Ursula Nowatzki*, minha tia *Dorly Olga Nowatzki* e em especial a minha mãe *Elli Nowatzki*.

*“Há uma harmonia na natureza,
uma harmonia invisível [...].
Descubra um certo tipo de solo e
um certo tipo de planta que você encontrará um
certo tipo de rocha.
E o mesmo acontece com as plantas,
elas estão relacionadas com o solo,
seu clima e sua altitude”.*

Alexander von Humboldt,
em uma viagem aos Andes em 1789.

土

Kanji representando a palavra “solo”,
o qual evoca uma planta enraizada.

RESUMO

Os diferentes tipos de solos podem ser compartimentados de acordo com diversas características do relevo. A Pedometria se baseia nas características dos atributos topográficos primários e secundários, que são gerados a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT) por técnicas de geoprocessamento. Esses atributos podem representar a distribuição de Unidades Geomórficas, que indicam a presença de determinados tipos de solos. A Pedometria pode complementar mapeamentos tradicionais de solos, auxiliando-os na definição dos limites entre as classes. Com o objetivo de mapear Unidades Geomórficas, foram primeiramente mapeados sete atributos topográficos para a bacia hidrográfica do rio Pequeno (Antonina/PR), sendo os primários: Hipsometria, Clinografia, Perfil e Plano de Curvatura e os secundários: Índice de Corrente de Máximo Fluxo, Índice Topográfico de Umidade e Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos. Desses atributos, os que melhor representaram aspectos para a distinção de Unidades Geomórficas foram todos os atributos secundários e a Clinografia. Cada um dos atributos foi dividido em classes que representassem a realidade dos tipos de solos existentes no rio Pequeno, com base na consulta de mapeamentos preexistentes e pelas características topográficas locais. A partir das classes dos atributos escolhidos, foram feitos cruzamentos das classes por Tabulação Cruzada que resultou na identificação de quatro Grupos. Grupo 1: Áreas planas e úmidas características de solos hidromórficos/flúvicos. Grupo 2: Terço médio de vertente com declives intermediários onde podem ocorrer os Cambissolos Háplicos. Grupo 3: Áreas de terço superior com fortes declives com associação de Cambissolos Háplicos com Neossolos Litólicos. Grupo 4: Áreas escarpadas de Serra com Neossolos Litólicos e possibilidade de afloramentos rochosos. Foi realizado levantamento de campo que auxiliou o mapeamento dos Grupos, principalmente nas transições entre o 1 e o 2. O mapa de comparação engloba toda a área de drenagem da baía de Antonina. De acordo com o parâmetro da Exatidão Global, a concordância entre os dois mapeamentos foi de 65%. A partir de uma Matriz de Erros, foi possível analisar quais as classes que foram superestimadas e subestimadas através dos erros de inclusão e omissão, bem como a Exatidão do ponto de vista do Usuário (EU) e Produtor (UP). A classe que apresentou um melhor EU foi a do Grupo 1, com 88% de acertos com o Grupo 1 do mapeamento preexistente. A pior foi a do Grupo 3, com 42% pois existem áreas montanhosas superestimadas pertencentes ao Grupo 2. O método da Tabulação Cruzada permitiu chegar a resultados satisfatórios de acordo com os objetivos propostos e com essa metodologia de interpretação de variáveis do relevo, chegar a um mapeamento preliminar de solos.

Palavras-chave: Pedometria, Mapeamento Digital de Solos, Modelo Digital do Terreno, Atributos Topográficos e Tabulação Cruzada

ABSTRACT

The different types of soils can be compartmentalised according with various features of relief. Pedometrics is based on the characteristics of primary and secondary topographic attributes, which are generated from a Digital Terrain Model (DTM) for geoprocessing techniques. These attributes may represent the distribution of Geomorphic Units, which indicate the presence of certain types of soils. Pedometrics can complement traditional soil mapping, assisting them in defining the boundaries between classes. With the objective of mapping Geomorphic Units, were first mapped seven topographic attributes for the Pequeno drainage basin (Antonina / PR), by the primary: Elevation, Slope, Profile and Plan Curvature and by the secondary: Stream Power Index, Wetness Index and Sediment Transport Index. The best attributes that represented the aspects for the distinction of Geomorphic Units were all secondary attributes and Slope. Each of the attributes was divided into classes that represent the reality of the types of soils in the Pequeno drainage basin, based on the consultation of existing mappings and the local topographical features. From the classes of the chosen attributes, were made crosses between classes by Cross-Tabulation which resulted in identification of four groups. Group 1: Flat areas of humid lowlands and fluvic features. Group 2: Middle slope with intermediate slopes where can occur Inceptisol. Group 3: Upper slope areas with steep slopes with Inceptisol associated with Leptosols. Group 4: Sierra escarped areas with Leptosols and possibility of rocky outcrops. It was conducted field survey that helped the mapping of Groups, especially in transitions between the 1 and the 2. The comparison map encompasses the entire drainage area of the Antonina Bay. According to the Global Accuracy parameter, the correlation between the two maps was 65%. From an Error Matrix of it was possible to examine which classes were overestimated and underestimated by the errors of inclusion and omission, as well as the the producer's and the user's standpoints. The class that showed a better user's standpoints was the Group 1, with 88% of accuracy with Group 1 of the existing mapping. The worst was the Group 3, with 42% overestimation because there are mountainous areas belonging to Group 2. The Cross-Tabulation method allowed reaching satisfactory results according to the proposed objectives and with this interpretation methodology of relief variables, reaching a preliminary mapping of soils.

Key-words: Pedometrics, Digital Soil Mapping, Digital Terrain Model, Topographic Attributes and Cross-Tabulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pequeno	19
Figura 2 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pequeno a partir da APA de Guaraqueçaba.....	20
Figura 3 – Modelo Digital do Terreno da bacia do rio Pequeno.	22
Figura 4 – Mapa de caracterização Geológica, Geomorfológica e de Cobertura Vegetal e Uso da Terra da bacia hidrográfica do rio Pequeno	23
Figura 5 – Os horizontes do solo em um perfil	28
Figura 6 – Processos interativos que conectam a Pedosfera com a Atmosfera, Hidrosfera, Litosfera e a Biosfera.	29
Figura 7 – A Pedometria em relação a outros ramos da ciência.	40
Figura 8 – (a) Grade regular da superfície do solo; (b) Janela com nove nodos; (c) Janela com nove <i>pixels</i>	47
Figura 9 – Fluxo da água no plano de curvatura (setas pontilhadas) e fluxo da água no perfil da curvatura das vertentes (setas contínuas).	49
Figura 10 – (a) Modelo digital; (b) Direção do fluxo; (c) acumulação do fluxo ou área de contribuição	52
Figura 11 – Mapeamentos de Solos do Estado do Paraná da Embrapa 1:600.000 e 1:250.000 (1984 e 2008)	60
Figura 12 – Mapeamento pedológico da bacia hidrográfica do rio Pequeno.....	62
Figura 13 – Agrupamento das classes pedológicas do mapeamento de Santos et al. (2009).....	65
Figura 14 – Mapa de localização dos pontos de coleta de solos na bacia	70
Figura 15 – Mapa de classes Hipsométricas.....	72
Figura 16 – Comparação entre o atributo Hipsometria com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente	73
Figura 17 – Mapa de classes Clinográficas.....	75
Figura 18 – Comparação entre o atributo Clinografia com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente	76
Figura 19 – Mapa de classes do Perfil de curvatura	77
Figura 20 – Mapa de classes do Plano de curvatura	78

Figura 21 – Comparação entre o atributo Perfil de Curvatura com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente.....	79
Figura 22 – Comparação entre o atributo Plano de Curvatura com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente.....	79
Figura 23 – Mapa do Índice de Corrente de Máximo Fluxo.....	80
Figura 24 – Comparação entre o atributo O Índice de Corrente de Máximo Fluxo com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente.....	81
Figura 25 – Mapa do Índice Topográfico de Umidade.....	82
Figura 26 – Comparação entre o atributo Índice Topográfico de Umidade com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente.....	83
Figura 27 – Mapa do Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos.....	84
Figura 28 – Comparação entre o atributo Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente	85
Figura 29 – Índices Topográfico de Umidade com Corrente de Máximo Fluxo e Clinografia com Capacidade de transporte de Sedimentos	86
Figura 30 – Grupos de Unidades Geomórficas geradas por tabulação cruzada	87
Figura 31 – Representação de uma porção da bacia através dos Grupos resultantes e os atributos topográficos escolhidos: (a) Topográfico de Umidade; (b) Corrente de Máximo Fluxo; (c) Clinografia; (d) Capacidade de Transporte de Sedimentos	91
Figura 32 – Representação de uma coleta em encosta e outra na Planície Aluvial (Pontos 4 e 5).....	94
Figura 33 – Compartimentação a partir do Google Earth.....	95
Figura 34 – Áreas de concordância e discordância entre os mapeamentos comparados.....	99
Figura 35 – Espacialização das combinações resultantes pela Matriz de Erro	102
Figura 36 – Distinção entre as concordâncias e discordâncias entre os Grupos do mapeamento de Santos et al. (2009) e os Grupos gerados pela Pedometria	105

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Tipos de levantamentos pedológicos de acordo com faixas de observação.....	36
Quadro 2 – Classes Clinográficas	49
Quadro 3 – Síntese da divisão dos pesos das classes dos atributos topográficos ...	55
Quadro 4 – Matriz de tabulação dos atributos Topográfico de Umidade com Corrente de Máximo Fluxo	55
Quadro 5 – Síntese das características resultantes da matriz de tabulação dos atributos Topográfico de Umidade com Corrente de Máximo Fluxo.....	56
Quadro 6 – Matriz de tabulação dos atributos Capacidade de Transporte de Sedimentos com Clinografia.....	57
Quadro 7 – Síntese das características resultantes da matriz de tabulação dos atributos Capacidade de Transporte de Sedimentos e de Clinografia	57
Quadro 8 – Matriz de tabulação para obtenção das Unidades Geomórficas	58
Quadro 9 – Síntese das características das Unidades Geomórficas	58
Quadro 10 – Classes de solos encontradas na bacia do rio Pequeno	61
Quadro 11 – Classes de solos agrupadas em função de características morfológicas semelhantes	63
Quadro 12 – Matriz de Erros parcial comparando os Grupos da Pedometria com o mapeamento de Santos <i>et al.</i> (2009).	67
Quadro 13 – Classificação pedológica de acordo com as Unidades Geomórficas ...	90
Quadro 14 – Informações gerais dos pontos coletados no trabalho de campo.....	92
Quadro 15 – Combinações entre os Grupos dos dois mapeamentos	99
Quadro 16 – Matriz de erros completa comparando os Grupos da Pedometria com o mapeamento de Santos <i>et al.</i> (2009)	100
Quadro 17 – Exatidão do ponto de vista do Usuário	102
Quadro 18 – Exatidão do ponto de vista do Produtor.....	104
Tabela 1 – Cálculo de área dos agrupamentos pedológicos.....	64
Tabela 2 – Cálculo de área – Hipsometria	73
Tabela 3 – Cálculo de área – Clinografia	76
Tabela 4 – Cálculo de área – Perfil de curvatura	78

Tabela 5 – Cálculo de área – Plano de Curvatura.....	78
Tabela 6 – Cálculo de área – Índice de Corrente de Máximo Fluxo.....	81
Tabela 7 – Cálculo de área – Índice Topográfico de Umidade.....	83
Tabela 8 – Cálculo de área – Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos.	85
Tabela 9 – Cálculo das áreas dos Grupos referentes às Unidades Geomórficas	88
Tabela 10 – Síntese dos resultados provenientes da Exatidão Global	98

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Trado holandês desmontado.....	44
Fotografia 2 – Trado Holandês montado	44
Fotografia 3 – Pedocomparador	44
Fotografia 4 – Coleta do ponto 4	93
Fotografia 5 – Coleta do ponto 5	93
Fotografia 6 – Compartimentação pedológica feita em campo	94
Fotografia 7 – Rio do Quebra	95
Fotografia 8 – Compartimentos de porção serrana e planície (Classes I e III).....	97
Fotografia 9 – Vista de todos os compartimentos (Classes I, II e III)	97

SUMÁRIO

Resumo	8
Abstract	9
Lista de Ilustrações	10
Lista de Quadros e Tabelas	12
Lista de Fotografias	14
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA.....	24
2.1.1. Fundamentos básicos da Pedologia	24
2.1.2. A ciência do solo no âmbito do meio ambiente.....	29
2.1.3. As relações entre o relevo e os solos	31
2.1.4. Mapeamentos tradicionais de solos.....	34
2.1.4.1. Objetivos e finalidades dos mapeamentos pedológicos	36
2.1.5. Mapeamentos Digitais de Solos	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	43
3.1.1. Softwares	43
3.1.2. Equipamentos de campo	43
3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	45
3.2.1. Mapeamento digital de solos a partir de atributos topográficos	45
3.2.2. Atributos topográficos primários.....	47
3.2.3. Atributos topográficos secundários	51
3.2.4. Tabulação cruzada	53
3.2.4.1. Método de integração de atributos topográficos.....	54

3.2.5. Mapeamentos pedológicos preexistentes na bacia do rio Pequeno	59
3.2.5.1. Mapeamentos de Solos do Estado do Paraná da Embrapa	60
3.2.5.2. Mapeamento de Solos da área de drenagem da baía de Antonina....	61
3.2.6. Métodos de comparação entre o mapa gerado por Pedometria e o preexistente	65
3.2.7. Levantamentos de campo.....	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS	71
4.1.1. Caracterização dos atributos topográficos primários	71
4.1.1.1. Hipsometria (Z)	71
4.1.1.3. Perfil (φ) e Plano (ψ) de curvatura.....	76
4.1.2.1. Índice de Corrente de Máximo Fluxo (Ω).....	79
4.1.2.2. Índice Topográfico de Umidade (w).....	81
4.1.2.3. Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (τ).....	83
4.2. MAPEAMENTO DE SOLOS POR TABULAÇÃO CRUZADA.....	85
4.2.1. Tabulação cruzada entre os atributos topográficos escolhidos	85
4.2.2. Mapeamento final de solos a partir de Unidades Geomórficas.....	86
4.2.3. Acompanhamento de campo	92
4.3. COMPARAÇÕES ENTRE OS GRUPOS CLASSIFICADAS PELA PEDOMETRIA COM O MAPEAMENTO PREEXISTENTE.....	97
5.3.1. Exatidão global	98
4.3.2. Matriz de erro.....	99
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1. INTRODUÇÃO

Entre os recursos naturais de nosso planeta, os solos são de relevante importância, sobretudo porque a maior parte dos nossos alimentos, direta ou indiretamente, provém dos campos de cultivo e pastagens neles implantados. Também muito nos importam porque sustentam campos, cerrados, florestas e recebem a água das chuvas que depois emerge nas nascentes e mananciais (LEPSCH, 2002).

Conforme destacam McBratney *et al.* (2000) para um manejo eficaz do solo é necessário compreender sua distribuição na paisagem, pois assim, permite-se que um manejo do uso da terra possa manter as suas limitações e restrições, permitindo deste modo a tomada de decisões sábias a respeito desse uso pelos planejadores e atores políticos, como no caso de estudos de impactos ambientais.

Segundo Coelho (2010) os mapeamentos de solos em escalas grandes, precisam necessariamente de um controle adequado de campo para ter resultados mais precisos e confiáveis e muitas vezes este controle acaba tendo elevado custo financeiro, bem como um longo tempo necessário para se realizar tais levantamentos. Segundo este autor, além desses custos, leva-se bastante tempo para elaboração de mapas com escalas de maior detalhamento, utilizando métodos convencionais de mapeamento. Em contrapartida, os métodos de mapeamento supervisionados, por meios computacionais, estão sendo trabalhados e refinados, com a finalidade de subsidiar a falta desses dados.

Assim, o uso de métodos organizados em Sistema de Informação Geográfica (SIG), baseados na elaboração de variáveis derivadas do Modelo Digital do Terreno e associados à distribuição de ocorrência das classes de solos, assumem grande importância pelo alto custo-benefício para mapeamento de solos em escalas detalhadas e semi-detalhadas (COELHO, 2010).

Deste modo, estudos quantitativos em solos têm sido desenvolvidos em área da ciência do solo denominada Pedometria. Definida como o desenvolvimento de modelos numéricos ou estatísticos a partir de relações entre variáveis ambientais e o solo, os quais são aplicados a um banco de dados geográfico para criar um mapa preditivo. Desta maneira, podem diminuir a quantidade de coletas de solos em um mapeamento de solos. (MCBRATNEY *et al.*, 2000 e TEN CATEN, 2009).

Sirtoli (2008) e Silveira (2010) destacam a proximidade que existe entre a Geomorfologia, com a distribuição dos solos nas paisagens. Eles apontam que as técnicas de Pedometria consistem, em mapear classes de solos de acordo com as características morfológicas das vertentes que compõe as bacias hidrográficas, sendo possível inferir onde estarão os solos com características hidromórficas, os mais profundos e os mais rasos.

O objetivo geral do presente trabalho é gerar um mapa preliminar de grupos de solos da bacia hidrográfica do rio Pequeno por Pedometria, a partir de atributos topográficos e pelo método da tabulação cruzada. Os objetivos específicos são:

- a) Gerar atributos topográficos primários e secundários da bacia hidrográfica do rio Pequeno (Antonina/PR) a partir de um Modelo Digital do Terreno;
- b) Confeccionar mapas dos atributos topográficos;
- c) Confeccionar um mapa de solos para a bacia do rio Pequeno a partir do mapeamento de solos da área de drenagem da baía de Antonina (SANTOS *et al.*, 2009);
- d) Realizar um controle de campo para auxiliar o mapa de Pedometria;
- e) Comparar o mapa gerado por Pedometria com o mapa de solos de Santos *et al.*, (2009) por Exatidão Global, Matriz de Erro, Erros de Omissão e Inclusão e Exatidão do ponto de vista de Usuário e Produtor;
- f) Averiguar as vantagens e desvantagens de aplicação do método de mapeamentos digitais de solos por tabulação cruzada.

A bacia hidrográfica do rio Pequeno (Figura 1), foi escolhida em virtude da disponibilidade de um mapa de solos de nível semidetalhado, que servirá de parâmetro para comparação com os resultados da Pedometria. Este mapeamento foi publicado em Paula e Santos (2008) e Santos *et al.* (2009) e abrange toda a área de drenagem da baía de Antonina. Esta bacia também foi escolhida pelos tipos de solos encontrados, sendo eles os Cambissolos, Neossolos e Gleissolos, característicos dos compartimentos geomorfológicos Serra do Mar e Planície Litorânea do Estado

do Paraná, sendo que estes compartimentos refletem na distribuição dos solos dessa região.

Essa bacia, localiza-se no município de Antonina, entre as coordenadas geográficas 25°07'30" e 25°17'00", ao sul da linha do Equador; e entre 48°37'30" e 48°44'00" a oeste do meridiano de Greenwich. A bacia do rio Pequeno faz limite com os municípios de Guaraqueçaba a leste e Campina Grande do Sul ao norte e está a aproximadamente 70 quilômetros da capital paranaense (Curitiba) no sentido SW-NE, com principal acesso feito pelas rodovias federais BR-116 ao norte e pela BR-277 ao sul. É interligada aos municípios costeiros do Paraná pelas rodovias estaduais PR-405 a leste e PR-340 ao sul.

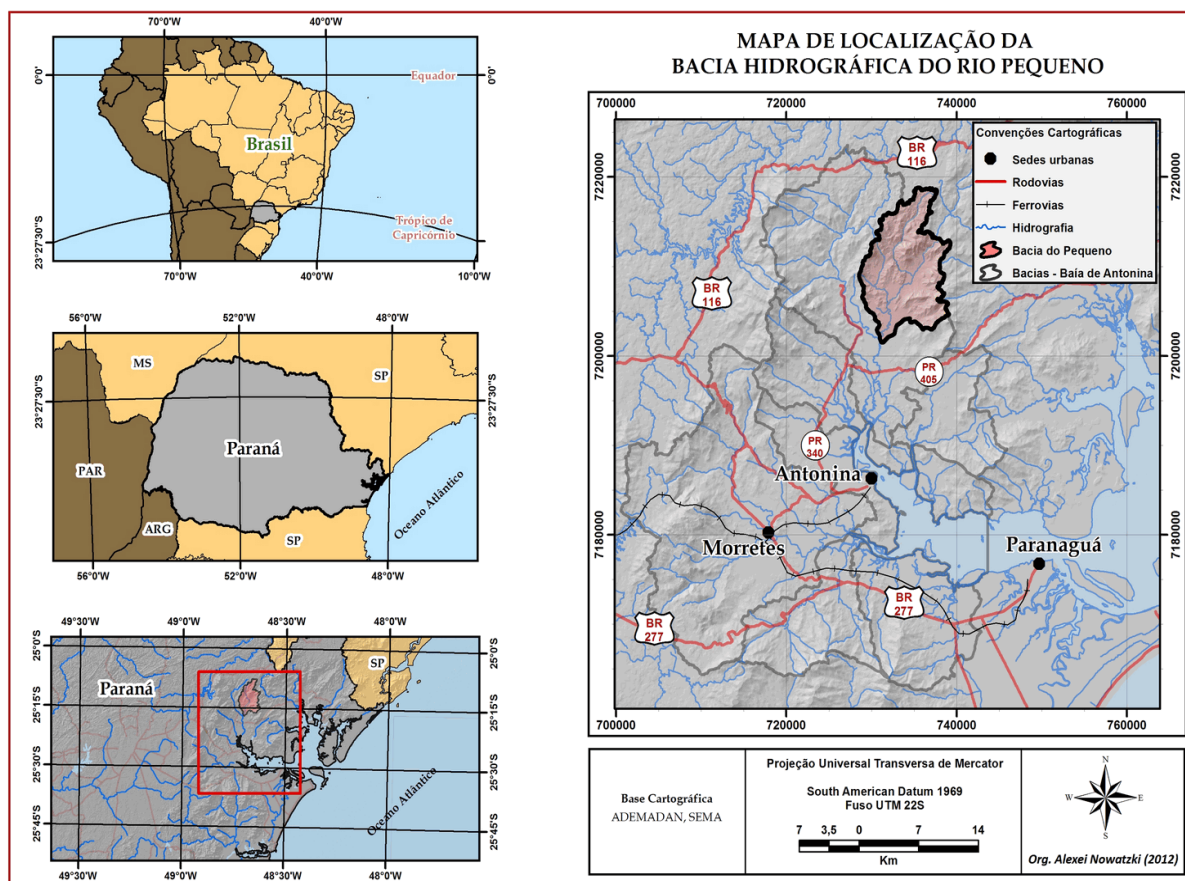


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pequeno

1.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Pequeno (Figura 2) se insere no interior da Área de Proteção Ambiental (APA) de Guaraqueçaba, sendo esta uma unidade de conservação de Uso Sustentável criada pelo Governo Federal em 1985 (ADEMADAN, 2012).



Figura 2 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pequeno a partir da APA de Guaraqueçaba.
Fonte: Ademadan (2012).

Essa bacia caracteriza-se hidrograficamente como uma bacia de sexta ordem na hierarquização fluvial proposta por Strahler (1952). Esta bacia possui 112,8 km² de área e seu canal hídrico principal homônimo percorre aproximadamente 17 quilômetros, nascendo na unidade de relevo denominada localmente como Serrinha com 566 metros de altitude sobre o nível do mar (s.n.m.) e convergindo para o rio Cachoeira na altitude de 9 metros s.n.m. Seus principais afluentes são: rio da Sorte, rio do Quebra, rio Pinheiro e rio Gervásio. O comprimento total dos canais hídricos da bacia do rio Pequeno é de 428,87 km e a densidade de drenagem situa-se em 3,9 km/km² (SILVA, 2010).

Em termos geológicos, a Serra do Mar Paranaense está inserida no denominado Cinturão Orogênico do Atlântico, cuja evolução envolveu diversos eventos tectônicos e magmáticos que remetem às sucessivas aberturas oceânicas. Diversos processos tectônicos complexos, com formação e colisão de continentes, originaram dobramentos, falhamentos e extenso magmatismo granítico no final do Proterozóico, formando bacias preenchidas por rochas vulcânicas e sedimentares. A porção paranaense do Escudo, que aflora próximo ao litoral e no Primeiro Planalto, é constituída por rochas ígneas e metamórficas com idade entre 2,6 bilhões de anos (Arqueano) e 450 milhões de anos (Proterozóico Inferior). As rochas mais antigas

ocorrem na porção sudeste das áreas costeiras, e refere-se à granulitos com alto grau de metamorfismo (MINEROPAR, 2001).

Conforme destaca Almeida *et al.* (1998), a origem da Serra do Mar está atribuída a processos tectônicos de movimentação vertical realizados no Cenozóico, no sítio onde ela se localiza. Seria portanto, em seu conjunto, um grande front dissecado de falhas em que termina o Planalto Atlântico. Para este autor a direção geral da Serra do Mar acompanha a orientação ENE das estruturas do Escudo Atlântico. A complexa história registrada entre o Pré-cambriano e o Eopaleozóico, que deu origem a diversas associações migmatíticas e metamórficas, bem como a inúmeros complexos ígneos, explica a ampla variedade de tipos litológicos do embasamento exposto.

Ao longo da bacia do rio Pequeno é possível observar os Complexos Granítico-Gnáissico, Gnaissico-Migmatítico, Cachoeira e Serra Negra, além das unidades Suíte álcali-granitos, Intrusivas granitoides e Sedimentos Recentes de planície litorânea.

Com relação aos aspectos Geomorfológicos, a bacia é integrante da unidade fisiográfica Serra do Mar Paranaense em sua maior parte, limitada a noroeste com o Primeiro Planalto Paranaense ou Planalto de Curitiba. Na porção sul da bacia encontra-se a Planície Litorânea, conforme denominações de Maack (1981).

A geomorfologia da Serra do Mar, segundo Bigarella *et. al.* (1978), pode ser caracterizada como um grande sistema montanhoso que se estende do Espírito Santo ao sul de Santa Catarina que se desenvolveu paralelo à linha de costa, constituindo no estado do Paraná, o limite entre o Primeiro Planalto e a Planície Costeira, formando serras marginais descontínuas elevadas, com altitudes que variam entre 500 e 1000 metros acima do nível do planalto. Em território paranaense a Serra do Mar é separada do oceano Atlântico por baixadas colúvio-aluvionares com larguras que atingem até 50 quilômetros. Sua distribuição geográfica, não uniforme, constitui-se como um complexo conjunto de montanhas em blocos “originados pelo rejuvenescimento de antigas linhas tectônicas e realçados consideravelmente pela ação de ciclos erosivos sucessivos”. (BIGARELLA *et. al.*, 1978). Na Figura 3 é apresentado o modelo digital do terreno que demonstra, em três dimensões, a distribuição dos padrões de relevo da bacia do rio Pequeno identificados por Silva (2010).

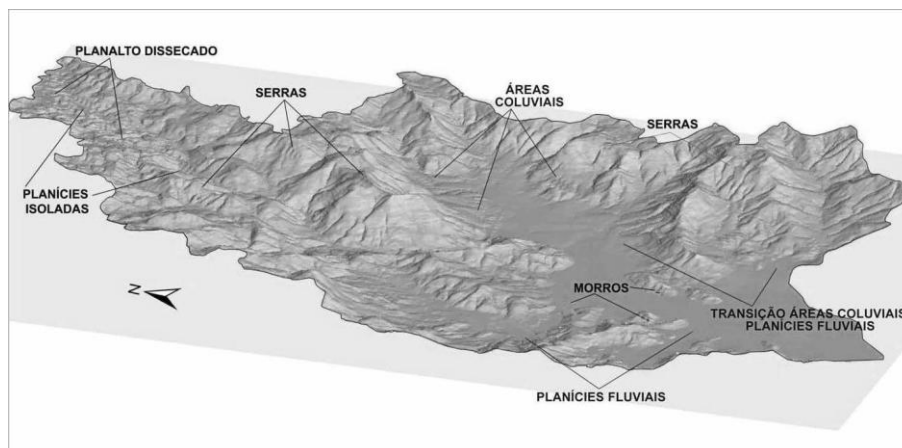


Figura 3 – Modelo Digital do Terreno da bacia do rio Pequeno.
Fonte: Silva (2010)

A caracterização geomorfológica (Figura 4) inclui a descrição das Unidades Ambientais Naturais (UAN) apresentadas no Macrozoneamento do Litoral Paranaense (IPARDES, 1989). Na Figura 3, pode-se ainda destacar que as porções de Serra ocupam a maior parte da bacia, bem como as Áreas Colúvies Montanhosas, ficando entre os compartimentos de Serra e de Planícies Aluviais.

De acordo com a Cobertura Vegetal e Uso da Terra é possível destacar que esta bacia encontra-se bastante preservada, sobretudo em áreas de Serra, cobertas por vegetação em estágios de sucessão ecológica Médios e Avançados de Floresta Ombrófila Densa dos tipos Altomontana, Montana, Submontana, de Terras Baixas e Aluvial (PARANÁ, 2002). Para elaborar esta caracterização na Figura 4, foram utilizados dados de Paula (2010).

Por fim, os aspectos pedológicos da Serra do Mar para Bigarella *et. al.* (1978) são resultantes da interrelação existente entre os componentes do meio físico, como o relevo acidentado, o histórico de movimentos de massa, a alta pluviosidade e as diferentes texturas e estruturas das rochas matrizes. Existe a predominância de solos com horizontes pouco desenvolvidos nas encostas mais íngremes, como os Cambissolos (Horizonte B incipiente) e os Neossolos Litólicos (Horizonte A sobre C) (EMBRAPA, 2006). Encontram-se ainda em algumas porções, solos mais profundos com espessura em torno de 1 metro nos depósitos colúvionares como Latossolos e Argissolos (BIGARELLA *et. al.*, 1978). Estes autores ainda apontam que nas áreas de transição para a planície litorânea aparecem solos arenosos e hidromórficos nas áreas de deposição fluvial (Cambissolos Flúvicos, Neossolos Flúvicos e Gleissolos).

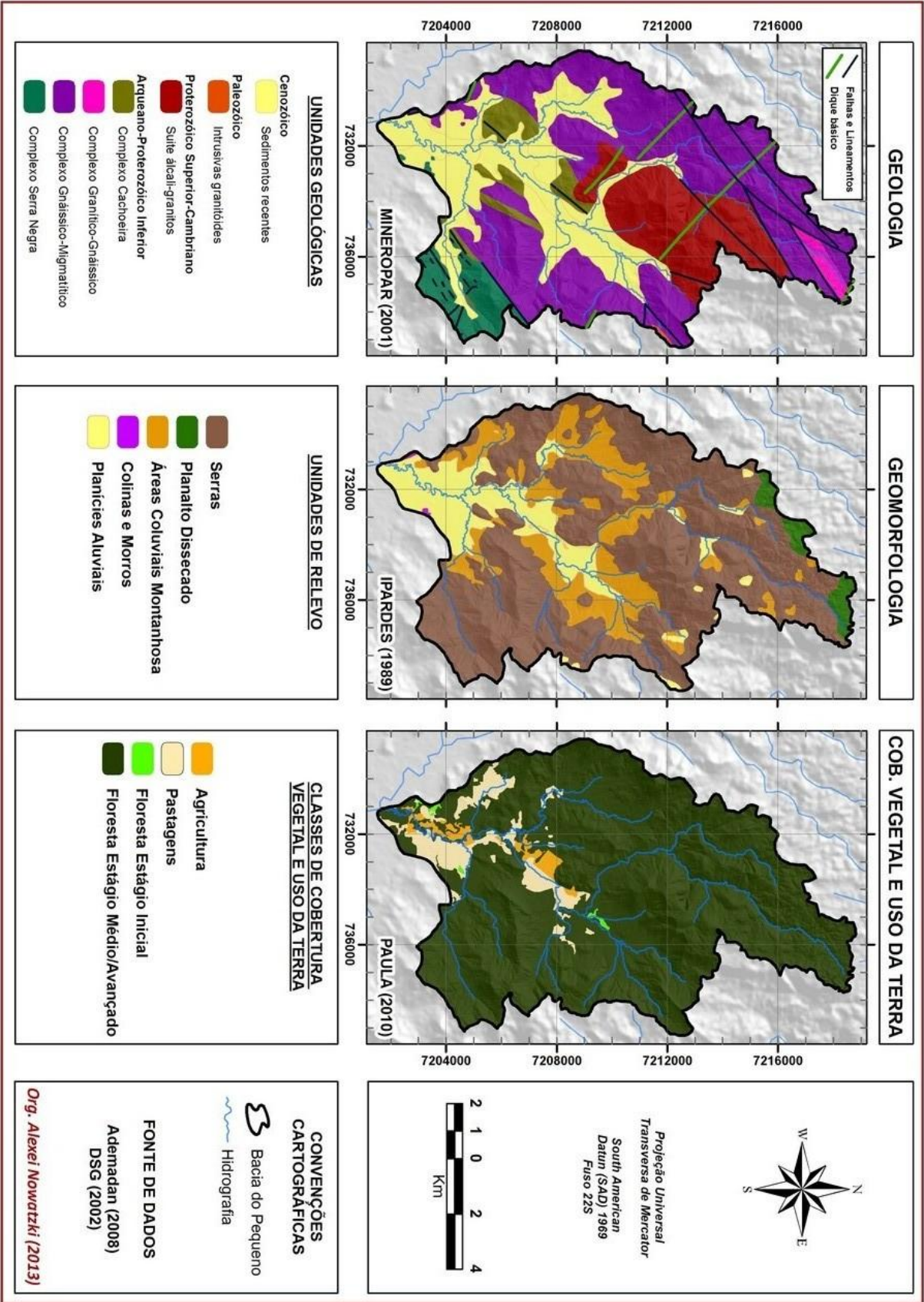


Figura 4 – Mapa de caracterização Geológica, Geomorfológica e de Cobertura Vegetal e Uso da Terra da bacia hidrográfica do rio Pequeno

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

Este item trouxe uma fundamentação teórico-metodológica de temas que envolvem as bases para o mapeamento digital de solos. Foram discutidos alguns fundamentos e conceitos que envolvem a Pedologia, a importância dos estudos dos solos no contexto de meio ambiente e as relações entre os solos e o relevo. Foi abordada ainda a temática dos mapeamentos tradicionais de solos que envolvem as atividades de campo e por fim os mapeamentos digitais de solos.

2.1.1. Fundamentos básicos da Pedologia

Desde seu início, a partir dos trabalhos do russo Vasily Dokuchaiev, o estudo dos solos esteve ligado aos problemas de sua utilização agrícola. Com isso surgiu a necessidade de estabelecer as características e as propriedades do solo de modo preciso, organizando o pensamento através da sua morfologia, espacialidade e integração na paisagem, com apoio de ciências exatas e naturais (QUEIROZ NETO, 2000).

Conforme destaca Lepsch (2011), a principal inovação proposta por Dokuchaiev e a escola russa, foi a observação do solo no campo, diferentemente da abordagem do químico Liebig, centrada nos aspectos químicos isolados. Essa nova abordagem, segundo o autor, permitiu a identificação de relações entre o solo – como corpo naturalmente desenvolvido sob a superfície terrestre – e fatores ambientais diversificados.

Cabe salientar que com a escola russa, o solo começou a ser estudado do ponto de vista genético, podendo ser então isolado de funções agrícolas, o que permitiu a diferenciação de solo e rocha, a categorização dos solos em diferentes classes, o desenvolvimento do conceito de horizonte, a distribuição dos solos na paisagem e a formalização do conceito “fator de formação”. Enfim, os fundamentos da Pedologia foram formados a partir do pensamento dessa escola (LEPSCH, 2011).

Espindola (2008, p. 27) destaca que antes de chegar à condição de ser estudado na conformação de uma ciência, com seus vários ramos, muitas vezes o solo

foi considerado um simples meio de suporte as plantas, ou um meio fornecedor de elementos nutritivos, ou ainda um simples manto de intemperismo das rochas. Pesquisadores de diversos campos de conhecimento, cientistas e profissionais de diversas procedências podem interessar-se pelo estudo do solo; nas ciências agrárias, geológicas, ambientais, construções civis, saneamento, ecologia etc., aquele singular corpo da natureza pode estar presente nas investigações.

Uma das maneiras de se estudar o solo é considerá-lo como uma parte natural da paisagem tendo como maior interesse o estudo da sua origem, evolução e classificação sob o ponto de vista pedológico. Para esse ramo da ciência dá-se o nome de **Pedologia**, (derivado do termo grego *pedom*, que significa solo ou terra). A outra maneira, considera o solo como um meio natural, onde o homem cultiva as plantas. Nesse caso, o solo é estudado sob o ponto de vista edafológico e dá-se o nome de **Edafologia** (do grego *edafos*, que significa terreno ou chão) (LEPSCH, 2002).

Conforme aponta este autor, o pedólogo se interessa não só pela camada superficial do solo, mas sim também pelas demais, denominadas horizontes do solo. Ele considera o solo como objeto completo que teve sua formação iniciada a partir de uma rocha que se desagregou mecanicamente e se decompôs quimicamente até formar um material inconsolidado, que com o passar do tempo aprofundou-se e veio a sustentar as plantas na paisagem.

Segundo o *Soil Survey Manual* (SOIL SURVEY STAFF, 1993), os solos em geral, podem ser definidos como corpos naturais, ocupando porções na superfície terrestre, suportando plantas e as edificações do homem e que apresentam propriedades resultantes da atuação integrada do clima e dos organismos, atuando sobre o material de origem, condicionado pelo relevo, durante um período de tempo.

Logo, Lepsch (2002), define solo como uma massa natural que compõe a superfície da Terra, que suporta ou é capaz de suportar plantas, ou também como a coleção de corpos naturais que contêm matéria viva e é resultante da ação do clima e da biosfera sobre a rocha, cuja transformação em solo se realiza durante certo tempo e é influenciada pelo tipo de relevo.

Já para Larach (1981) o solo é definido como “um meio natural para o desenvolvimento das plantas terrestres, recobrando a Terra como camada quase

contínua de pólo a pólo”. Este autor também argumenta sobre os cinco fatores pedogenéticos apresentados anteriormente, contudo, ele considera ainda os efeitos acrescidos do uso do solo pelo homem.

Segundo Espinola (2010) os cinco fatores de formação dos solos (pedogênese), cuja ação integrada dos mesmos desencadeia processos internos complexos, mediante distintas combinações entre mecanismos de translocações (seletivas e não seletivas), transformações dos constituintes gerados pelas alterações mineralógicas, adições ao manto de alteração e perdas subsuperficiais.

Enfim, existem diversas maneiras de se definir o conceito de solo. Tudo depende de qual ponto de vista está sendo feita a observação, pois o solo pode conter diversas interpretações, sob o ponto de vista da Geografia, da Geologia, da Engenharia ou da Agronomia. Chagas (1996) por exemplo, define o solo por aquela parte fértil da superfície sólida da Terra. Essa parte fértil é onde crescem (ou tem a possibilidade de crescer) os vegetais, naturalmente ou plantados pelo homem.

Por esta razão, alguns autores argumentam que a formação do solo começaria apenas no momento em que determinados tipos de organismos se instalaram sobre as rochas, desenvolvendo-se aí, um processo biológico (VILENSKI 1937, *apud* ESPINOLA, 2008). Para este autor, isso já faz antever o solo como um verdadeiro corpo vivo, não como um material inerte, ou seja, um mero aglomerado de partículas desagregadas (manto de alteração).

A ciência do solo, é uma disciplina geoecológica, quando esta trata da gênese no âmbito da Pedologia. O mais apropriado seria considerar o solo um sistema aberto, devendo sua formação ser entendida mais como uma metamorfose (sentido geológico) e uma sucessão (sentido biológico) do que propriamente uma gênese, no sentido biológico. Um encadeamento de fatores determinaria processos e estes, as feições ou propriedades (SCHLICHTING, 1982 *apud* ESPINOLA, 2008).

Com os intemperismos químico, físico e biológicos as rochas se transformam em um material friável tendo uma ação conjunta de fenômenos que origina os solos, nas quais se organiza em camadas de aspectos e constituições diferentes, aproximadamente paralelos à superfície, que são denominados **horizontes** (LEPSCH, 2002).

Em outras palavras, Lepsch (2011) coloca que o conjunto de processos físicos e bioquímicos que desgasta as rochas, modificando suas características físicas e químicas, transformando-as em fragmentos pequenos e solubilizando

alguns de seus constituintes. Nesses processos, alguns dos elementos dos minerais permanecem como um resíduo alterado, enquanto outros são removidos, transportados principalmente pela água. O intemperismo também sintetiza novos minerais que têm grande importância para o solo e a vida que ele sustenta.

O conjunto de horizontes, num corte vertical que vai da superfície até o material semelhante ao que deu origem ao solo, é o **perfil** do solo (LEPSCH, 2002). Este autor ainda destaca que o perfil de um solo possui basicamente quatro tipos de horizontes e são convencionalmente identificados pelas letras maiúsculas O, A, B e C. Respectivamente, o horizonte O é constituído de folhas e galhos que caíram dos vegetais e pelos primeiros produtos em decomposição, encontrados apenas em locais com vegetação natural. O horizonte A, é uma camada mineral, próxima da superfície, com um certo acúmulo de matéria orgânica (parcial ou totalmente humificada) e/ou perda de materiais sólidos translocados para o horizonte B. Este pode ser definido como aquele horizonte que apresenta o maior desenvolvimento de cor, estrutura e /ou o que possui acumulação de materiais translocados de horizontes subjacentes. Abaixo do B, situa-se o horizonte C que corresponde ao saprólito, ou seja, é a rocha pouco alterada pelos processos pedogenéticos. Desta maneira, suas características são semelhantes ao material do qual o solo se formou, como a rocha matriz (LEPSCH, 2002; QUEIROZ NETO, 2000).

Da mesma maneira, no Manual Técnico de Pedologia do IBGE (IBGE, 2007) um perfil de solo é definido como “um corte vertical na superfície da terra, que inclui todos os horizontes pedogeneticamente inter-relacionados e/ou camadas que tenham sido pouco influenciadas pelos processos pedogenéticos”. O perfil é entendido, conforme este manual, como uma face exposta do solo, que é reconhecido, classificado e descrito no campo. Somente em situações muito raras é que um perfil coincide com as dimensões de um *pedon*.

A Figura 5 é um exemplo de um perfil de solo, com a diferenciação entre os Horizontes A, B e C.

2.1.2. A ciência do solo no âmbito do meio ambiente

A sustentabilidade ambiental depende, dentre outros fatores, do adequado funcionamento do solo, pois as principais interações bióticas e, conseqüentemente, a regulação dos ecossistemas ocorrem no solo (VEZZANI & MIELNICZUK, 2011).

Estes autores reforçam a ideia de que no ambiente, o solo funciona como meio para o crescimento das plantas, regula e compartimentaliza o fluxo de água, estoca e promove a ciclagem de elementos químicos e serve como tampão ambiental na formação, atenuação e degradação de compostos prejudiciais ao ambiente.

Para Vezzani & Mielniczuk (2011) se o solo funcionar adequadamente, ele tem capacidade de sustentar a produtividade de plantas e animais, de manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e acima de tudo, dos homens.

Desta maneira podemos pensar na coletividade dos solos como a “Pedosfera”, sendo esta a camada que seria a ligação entre a Atmosfera, Hidrosfera, Litosfera e a Biosfera, conforme é possível compreender a partir da Figura 6.

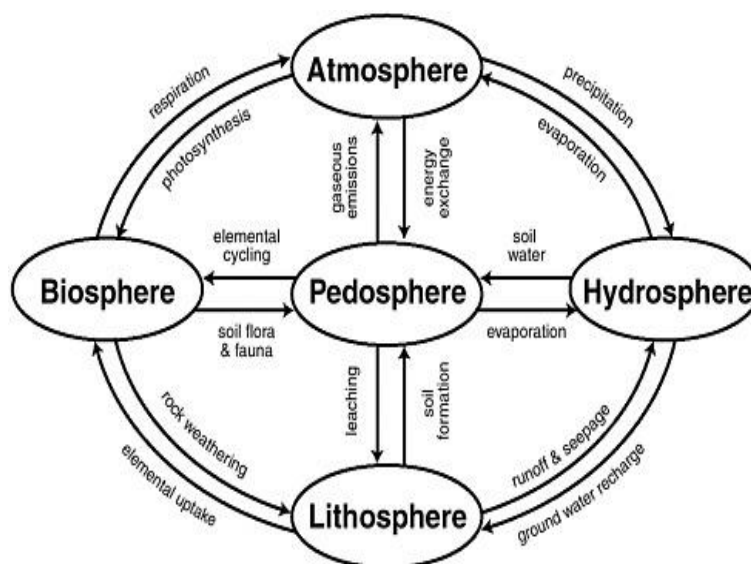


Figura 6 – Processos interativos que conectam a Pedosfera com a Atmosfera, Hidrosfera, Litosfera e a Biosfera.

Fonte: Steering committee for frontiers in soil science research; national research council (2009)

Conforme o livro Steering committee for frontiers in soil science research; National research council (2009, p. 1),

os processos que ocorrem dentro do solo estão intimamente ligados aos serviços dos ecossistemas, tais como a quantidade e qualidade da água, que são importantes na troca de gases atmosféricos, e são fundamentais para os ciclos biogeoquímicos dos nutrientes e carbono que sustentam a vida. O solo suporta a mais rica biodiversidade da Terra e funciona como um filtro para contaminantes orgânicos e inorgânicos, bem como microrganismos patogênicos e vírus de um modo geral. Apesar da relação entre a qualidade do recurso solo e da ascensão e queda de civilizações do mundo que tem sido repetida ao longo da história, o solo continua a ser um recurso subestimado e subvalorizado.

O reconhecimento, a compreensão e a delineamento das múltiplas variáveis que compõe o meio físico-natural são de grande importância para alicerçar ações de planejamento e gestão ambiental e territorial. Uma dessas variáveis é o mapeamento de solos, pois auxilia em todos os âmbitos na ocupação e uso da terra (SILVEIRA, 2010).

Uma vez que o solo é o suporte dos ecossistemas e das atividades humanas sobre a terra, seu estudo é imprescindível para um planejamento ambiental. Quando se analisa o solo, pode-se deduzir sua potencialidade e fragilidade como elemento natural, como recurso produtivo, como substrato de atividades construtivas ou como concentrador de impacto (SANTOS, 2004). Para este autor o solo é um tema importante para explicar o fenômeno da erosão e do assoreamento, cuja compreensão é primordial para o planejamento.

Nesse sentido, Sirtoli (2008) argumenta que os solos representam extrema importância em estudos ambientais pois uma vez que os processos do meio físico (erosão, escorregamentos, assoreamento, contaminação, colapsos e subsidências, recalques, etc.) ocorrem predominantemente no solo e por ele são condicionados.

Em áreas rurais esses processos podem estar ligados às atividades vinculadas a agricultura e a pecuária, reconhecidas por alterar substancialmente o meio, gerando impactos severos e rompendo o equilíbrio natural. Sem dúvida, o solo é o elemento conectivo entre essas atividades e o meio. Desta maneira, essas atividades devem pressupor os limites do solo e destinar seu uso ou ocupação em função de suas possibilidades de aproveitamento racional (SANTOS, 2004).

Já para o espaço urbano, segundo Santos (2004), a mesma lógica pode ser usada quando se pensa, por exemplo, na implantação e operação de obras civis, nas quais a característica do material de superfície pode definir a aptidão (ou

restrição) para diferentes usos, como estradas, sistemas de tratamento, construções de canais, sistemas de drenagem, entre outros.

Conforme destacam McBratney *et al.* (2000) o manejo eficaz do solo requer uma compreensão da distribuição dos padrões pedológicos na paisagem, do mesmo modo que o conhecimento do solo, permite um manejo do uso da terra que possa manter as suas limitações e restrições, permitindo desta maneira a tomada de decisões sábias a respeito do uso da terra pelos planejadores e atores políticos. Para este autor, tradicionalmente o planejamento de manejo do solo e uso da terra foram os principais objetivos gerais de levantamento de solos em todas as escalas.

Os solos são tipificados em função de suas potencialidades e fragilidades frente as atividades humanas e suas intempéries naturais. O esforço é dirigido para a sua conservação, seja em relação à necessidade de preservação do recurso sob o enfoque da produtividade, seja e virtude a vulnerabilidade ou baixa fertilidade que caracteriza a maioria dos solos brasileiros (SANTOS, 2004).

No entanto, McBratney *et al.* (2000) conclui que com crescente preocupação sobre as questões ambientais relacionadas com o nosso planeta, a pesquisa pedológica passou de sua conjectura tradicional subjetiva para mais quantitativa usando uma modelagem com precisão de acompanhamento e questões de incerteza.

2.1.3. As relações entre o relevo e os solos

Segundo Queiroz Neto (2000) a Geomorfologia e a Pedologia mantêm um vínculo eterno com outro ramo das ditas Ciências da Terra, a Geologia. Para este autor, ambas as ciências supramencionadas provém da transformação pelo intemperismo das rochas presentes na parte emersa da crosta terrestre, envolvendo aspectos de alteração e erosão. Este autor ainda lança a ideia que de um modo geral, os geomorfólogos e os pedólogos consideram que os solos aparecem virtualmente em todas as posições do relevo, pois o solo tem sua história ligada à própria história do relevo.

Salgado (2005), traz a ideia de que com a crescente discussão sobre a necessidade de interdisciplinaridade para os diversos tipos de estudos, principalmente os de ordem ambiental, a Pedogeomorfologia já nasce englobando

conhecimentos de cunho geomorfológico e pedológico, apreendendo, ainda, noções de Estratigrafia.

Para os pedólogos a busca entre o entendimento da relação relevo/solo ou morfogênese/pedogênese é permanente, desde a conceituação inicial de Dokutchaeff no último quarto do século XIX (1883). Ele dava prioridade ao clima como um fator importante de formação dos solos, reconhecia também a importância do sub solo, da vegetação, da fauna e do relevo (QUEIROZ NETO, 2011).

De acordo com o esquema davisiano de evolução do relevo, a uma fase de juventude, de vigorosa morfogênese, estariam associados solos jovens e rasos, que evoluiriam para a maturidade sob um relevo menos recortado, com mais equilíbrio entre erosão e acumulação de materiais (espessamento), até a senilidade, com a pedogênese refletindo solos num estágio máximo de desenvolvimento (ESPINDOLA, 2010).

Trabalhos desenvolvidos desde a década de sessenta do século passado demonstram a relação relevo/solo na América do Sul em que nas partes de relevo suave, que correspondem às antigas superfícies de erosão e sobre materiais detríticos, apareciam os latossolos, enquanto nas porções de relevo mais acidentado, rejuvenecido pela erosão mas em relação direta com o substrato geológico, apareceriam os Argissolos e Neossolos Litólicos pouco desenvolvidos (QUEIROZ NETO, 2000, p. 4). Este autor faz um resumo em quatro maneiras de como no Brasil foram interpretadas as relações entre relevo e solo:

- a) Através da posição ocupada pelos perfis na paisagem, relacionada à superfícies geomórficas de diferentes idades;
- b) Pela presença de diferenciações verticais no interior dos perfis de solo, interpretadas como descontinuidades erosivas; essas diferenciações poderiam ser marcadas pela presença de linhas de pedra e de horizontes escurecidos (enterrados);
- c) Pelo estabelecimento e cronosequências, através dos resultados de análises laboratoriais e de interpretação da morfologia dos perfis;
- d) Pela presença de corpos ferruginosos (cauraças, camadas concrecionárias), que denunciaram processos antigos de intemperismo.

No entanto, Queiroz Neto (2000) ainda destaca que a partir da década de 80 do século passado no Brasil, passou-se a estudar os solos sob um viés estrutural, ultrapassando deste modo, a visão verticalizada da Pedologia, calcada no estudo de perfis isolados, pois fora introduzida a análise da organização lateral/espacial dos solos ao longo das vertentes. Esse autor também ressalta que esse procedimento permite expor a participação dos processos superficiais na diferenciação lateral do solo e ainda possibilita perceber o papel e a importância dos processos pedológicos e geoquímicos na evolução do relevo.

Espindola (2010) argumenta que uma esclarecedora evidência da influência do relevo, ou das condições topográficas, sobre a natureza e as propriedades dos solos, ficaram devidamente estampadas com o emblemático conceito de **catena**, que colocava os solos de uma sequência topográfica como elos de uma corrente, cada um deles afetando o desenvolvimento do seu vizinho e o conjunto sendo influenciado pelas condições de drenagem interna.

Para Queiroz Neto (2011) existe uma forte influência da vertente (topografia) sobre os solos, pois segundo Jenny (1941) *apud* Queiroz Neto (2011), certas propriedades dos solos variariam ao longo das vertentes, como a granulometria, as bases trocáveis e outras características, variação interpretada como resultado da circulação hídrica.

Conforme destacam Ippoliti *et al.* (2005),

as relações entre os solos e as formas da paisagem têm sido, por longo tempo, a base do mapeamento de solos. Tradicionalmente, utiliza-se a análise estereoscópica de fotografias aéreas para o delineamento manual das unidades de solo-paisagem que, posteriormente, são constatadas no campo. A análise digital do terreno introduz algumas vantagens em relação ao método tradicional para a separação dessas unidades; é uma alternativa rápida e econômica que pode ser aplicada para a quantificação e classificação do relevo, permitindo a definição automática ou semi-automática das unidades morfológicas da paisagem (...). Em geral, os métodos que organizam a superfície de acordo com um modelo morfológico mostraram potencial para melhorar a predição de ocorrência dos tipos de solos, visto que a posição na paisagem influencia os processos de formação e os atributos pedológicos.

Diferentes classes de solos em diferentes posições do relevo remontam à ideia de que os processos de formação também são diferentes para cada segmento de uma vertente. Frequentemente a porção superior de uma encosta se caracteriza pela erosão, a porção intermediária se caracteriza pelo transporte de sedimentos e o

sopé pela deposição do material sedimentar; dessa maneira, as partes mais altas são mais drenadas, em relação as partes mais baixas, e esta diferença de drenagem é responsável pelas mudanças graduais nas características dos solos (GERRARD, 1981 *apud* COELHO, 2010).

Valladares e Hott (2008) também destacam que as formas do relevo representadas através de um modelo do terreno, tem um grande impacto sobre os solos por meio dos movimentos da água e de sedimentos, juntamente ainda com outros fatores, como a rocha-mãe.

2.1.4. Mapeamentos tradicionais de solos

As cartas pedológicas, ou levantamentos pedológicos podem ser definidos por Lepsch (2002) como a “aplicação sintética das informações pertinentes à formação e distribuição geográfica dos diferentes solos existentes em uma determinada localidade. As cartas pedológicas podem ter diferentes graus de detalhe, o que depende tanto da intensidade dos trabalhos de levantamento, como da escala de publicação”.

A demanda por mapeamentos de solos em escalas detalhadas torna-se necessária para embasar os estudos relacionados ao uso sustentável das terras, entre os diversos estudos envolvendo solos (LACERDA e BARBOSA, 2012).

No Brasil, desde a segunda metade do século passado, o serviço pedológico da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) realiza levantamentos de solos sistemáticos do território nacional. A partir desses levantamentos, em 1999, a EMBRAPA consolida o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 1999). Atualizado em 2006 (EMBRAPA, 2006) o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos é resultado de projeto nacional que envolveu a comunidade científica de Ciência do Solo. O desenvolvimento do sistema passou por diversas fases, desde a definição de classes até um sistema mais elaborado segundo princípios lógicos de taxonomia (COELHO, 2010).

O Manual Técnico de Pedologia do IBGE (IBGE, 2007), apresenta diversas informações sobre os levantamentos de solos que foram e são feitas no Brasil. Segundo este manual os levantamentos de solos envolvem pesquisas de gabinete, campo e laboratório, compreendendo ainda o registro de observações, análises e

interpretações de aspectos do meio físico e de características morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e biológicas dos solos, na qual visa sua caracterização, classificação e principalmente cartografia pedológica.

Um levantamento pedológico de acordo com Larach (1981), é um prognóstico da distribuição geográfica dos solos como corpos naturais, e ainda conforme IBGE (2007) eles são determinados por um conjunto de relações e propriedades observáveis na natureza. O levantamento identifica solos que passam a ser reconhecidos como unidades naturais, prevê e delinea suas áreas nos mapas/cartas, em termos de classes definidas de solos.

Para Avery (1980) *apud* IBGE (2007) um programa de levantamento pedológico requer a existência de um sistema organizado de classificação em caráter permanente de atualização, que possibilite a identificação dos solos, em termos consistentes e uniformes, para facilitar a comunicação e o uso de informações para fins interpretativos.

Para Coelho (2010) o mapeamento de solos envolve a determinação da localização e distribuição dos diferentes solos que ocorrem numa região, coleta de informações sobre sua localização, natureza, propriedades, potencial e usos. Os métodos tradicionais baseiam-se nas relações entre solos e fisiografias.

Esses métodos utilizam observação estereoscópica de pares de aerofotos, e a partir de então, é realizada interpretação visual das feições do relevo e, após, é feito levantamento de campo onde os solos são identificados e mapeados conforme a escala pretendida. Os solos são classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, considerando diversas características diagnósticas, tais como abundância e qualidade de material orgânico nos horizontes superficiais, espessura e número de horizontes, cor, material de origem, entre outros (PINTO *et al.*, 1999 *apud* Coelho, 2010).

Ainda, no manual supracitado é destacado que de maneira geral, um levantamento identifica e separa unidades de mapeamento. Compreende um mapa com legenda e um texto explicativo, que define, descreve e interpreta, para diversos fins, as classes de solos componentes das unidades de mapeamento. O mapa/carta é parte fundamental de um levantamento. Mostra a distribuição espacial de características dos solos e a composição de unidades de mapeamento, em termos de unidades taxonômicas, ressaltando, também, características do meio ambiente (IBGE, 2007).

Com base na experiência em diversos tipos de levantamentos pedológicos, executados no Brasil, IBGE (2007) traz um quadro comparativo entre os seguintes tipos de levantamentos, faixas de observações por área, bem como a escala de mapeamento (Quadro 1).

NÍVEL	FAIXAS DE OBSERVAÇÃO	ESCALA DE MAPEAMENTO
DETALHADO	0,20 - 4 observações/ha	1:500 a 1:20.000
SEMIDETALHADO	0,02 - 0,20 observações/ha	1:20.000 a 1:50.000
RECONHECIMENTO	0,04 - 2,00 observações/km ²	1:50.000 a 1:750.000
EXPLORATÓRIO	< 0,04 observações/km ²	1:750.000 a 1:2.500.000
ESQUEMÁTICO	sem especificação	1:2.500.000 <

Quadro 1 – Tipos de levantamentos pedológicos de acordo com faixas de observação. Adaptado de IBGE (2007).

2.1.4.1. Objetivos e finalidades dos mapeamentos pedológicos

Os levantamentos pedológicos têm objetivos bastante diversificados, desde a geração de conhecimentos sobre os solos de um país ou região, até o planejamento de uso e ocupação da terra para diversos fins, em nível de propriedade. O objetivo principal de um levantamento pedológico é subdividir áreas heterogêneas em parcelas mais homogêneas, que apresentem a menor variabilidade possível, em função dos parâmetros de classificação e das características utilizadas para distinção dos solos (IBGE, 2007).

Segundo Larach (1981), os levantamentos de solos em campo constituem o método mais efetivo para este fim, consistindo desta maneira no estudo, identificação e mapeamento dos solos em campo, compilação, análise e interpretação dos dados referentes às suas propriedades e suas interrelações e finalmente na preparação e publicação dos resultados.

Conforme aponta o Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2007), no Brasil, os levantamentos de solos têm atendido a instituições de assistência técnica, de planejamento e de execução de projetos, para fins de seleção de áreas para colonização, estudos de viabilidade técnica de projetos de irrigação e drenagem, avaliação de aptidão agrícola, zoneamentos diversos (pedoclimáticos,

socioeconômico-ecológicos, etc.), extrapolação de resultados de pesquisas, indenização de áreas inundadas por represas hidrelétricas, subsídios aos Estudos de Impactos Ambientais e Relatórios de Impactos ao Meio Ambiente - EIA-RIMAS, e seleção de áreas experimentais. Podem também fornecer subsídios para elaboração de estudos da capacidade de uso da terra, de cartas morfopedológicas e de estudos geoambientais. Têm também atendido a instituições de ensino e pesquisa, constituindo bases permanentes para atualização de conhecimentos e formação de profissionais das áreas de Agronomia, Engenharia e Geociências.

Este manual ainda coloca a idéia de que os levantamentos de solos proporcionam subsídios que poderão evitar que áreas inadequadas para exploração sejam desmatadas ou alteradas em suas condições naturais de equilíbrio, causando danos irreversíveis à natureza, sem o esperado retorno dos investimentos.

Larach (1981, p. 4) ainda expõe que os objetivos gerais dos levantamentos de solos podem ser resumidos por:

- a) determinar as características dos solos;
- b) classificar os solos em unidades definidas de um sistema uniforme de classificação de acordo com a nomenclatura padronizada;
- c) estabelecer e locar seus limites, mostrando em sua distribuição e arranjo (representação gráfica); e
- d) prever e determinar sua adaptabilidade para diferentes aplicações.

2.1.5. Mapeamentos Digitais de Solos

Conforme Larach (1981), os solos ocupam áreas e não somente pontos, devendo ser desta maneira entendidos e estudados como entidades, sendo que isto só se consegue integralmente em campo onde os solos podem ser integralmente observados em seu meio. Para este autor, isso é um grande problema para os levantamentos pedológicos, entretanto, com os avanços da tecnologia, algumas alternativas vêm surgindo para reverter este quadro.

A partir da inserção de técnicas computacionais, por meio do Geoprocessamento e do SIG (Sistema de Informações Geográficas), nos estudos ambientais, a Pedologia pôde se beneficiar com a criação de uma grande

quantidade de dados digitais e ferramentas computacionais, como aqueles fornecidos pelo Modelo Digital do Terreno (MDT), que estão sugerindo novos caminhos na pesquisa pedológica (McBRATNEY *et al.*, 2003).

Estes autores destacam que na Pedologia, o aumento do poder de ferramentas como os SIG, tais como aqueles fornecidos pelo Modelo Digital do Terreno (MDT), vem auxiliando os estudos de solos. Por sorte, estas ferramentas vêm em um momento em que há um clamor mundial para os dados relativos aos solos e informações para o monitoramento ambiental e modelagem.

Segundo Bonisch (2004) e McBratney *et al.* (2000), no passado os métodos convencionais de levantamentos de solos foram criticados por serem muito qualitativos nas caracterizações. Porém, nos últimos anos, observa-se o desenvolvimento de modelos quantitativos, que vem auxiliando os estudos Pedológicos de um modo geral, categorizados em um novo ramo da ciência do solo conhecido como Pedometria.

Conforme apontam McBratney *et al.* (2000), países como Austrália, Estados Unidos, França e Holanda, dentre outros, têm mudado a abordagem tradicional de estudo dos recursos naturais, adotando modelos quantitativos, técnicas de predição espacial, determinação de precisão e de incertezas de atributos e integração de dados em Sistema de Informações Geográficas. Da mesma forma, Gonzalez *et al.* (2008) afirmam que maior parte dos trabalhos de mapeamentos digitais preliminares de solos são feitos para zonas temperadas, correspondendo a América do Norte, Europa e ainda na Austrália. Isto se deve, segundo o autor, à escassez de dados espaciais, bem como uma escassez de financiamento para geração de base de dados e informações.

Atualmente, a utilização de geotecnologias no mundo todo tem permitido a elaboração de mapas pedológicos em escalas de semidetalhe ou detalhe, mediante o estabelecimento de modelos de distribuição de solos na paisagem por meio de relações pedomorfológicas (LACERDA e BARBOSA, 2012).

Um Mapeamento Digital de Solos, para Lagacherie (2008), pode ser definido como “a criação e a população de sistemas de informação espacial do solo por modelos numéricos que inferem variações espaciais e temporais dos tipos e propriedades do solo a partir da observação e conhecimento do solo junto com variáveis relacionadas com o meio ambiente”.

Nos últimos anos tem ocorrido um movimento entre os geógrafos que estudam o solo, para o chamado Mapeamento Digital de Solos, que pode ser entendido como predições de diferentes tipos de solos utilizando sistemas de informação geográfica (SIG), ou seja, é uma produção de propriedades digitais de solos e que visa auxiliar e complementar os trabalhos de campo e posteriores análises de laboratório (ROSSITER, 2008; McBRATNEY *et al.*, 2003).

Para Coelho e Giasson (2010) um Mapeamento Digital de Solos se baseia na geração de sistemas de informações que permitem estabelecer relações matemáticas entre variáveis ambientais (atributos do terreno) e classes de solos e, assim, predizer a distribuição espacial das classes de solos com significativa semelhança aos mapas gerados por meios convencionais.

Este conceito foi também denominado por alguns autores de Mapeamento Preditivo de Solos. Conforme Rossiter (2008) o desenvolvimento de um modelo numérico ou estatístico da relação entre as variáveis ambientais e propriedades do solo, a qual é então, aplicada a uma base de dados geográfica pode se criar um mapa preditivo de solos a partir de características do terreno.

Deste mesmo modo, os modelos solo-relevo mais quantitativos estão se tornando tendências dos levantamentos por se caracterizarem como técnicas atuais de auxílio para o levantamento de solos, bem como para o entendimento e predição dos padrões naturais do solo (HUDSON, 1992).

Esta tendência de mapeamentos de solos, chamados por “Digitais” ou “Preditivos”, tem resultado no avanço de inúmeros métodos conceituais, geoestatísticos e de geoprocessamento para descrever a distribuição de solos nas paisagens (ROSSITER, 2008). Utilizando a Pedometria, é possível estabelecer diversas relações entre os atributos topográficos provenientes de um Modelo Digital do Terreno com os compartimentos pedológicos de forma a aplicá-las no mapeamento preliminar de solos.

As formas do relevo, possíveis de serem analisadas também pelo MDT, exercem um papel decisivo no tempo de exposição dos materiais, na intensidade e direção do fluxo da água no perfil solo, influenciando portanto os processos pedogenéticos. O estudo das diferentes formas do relevo torna-se portanto premissa básica para a execução de levantamentos de solo (CAMPOS *et al.*, 2006).

Para Campos *et al.*, (2006) a utilização de um Modelo Digital do Terreno (MDT) é uma técnica que pode ser considerada como uma evolução do estudo do

solo, pois permite uma melhor visualização da inter-relação solo e paisagem através de associações da influência do relevo, do comportamento hídrico e da comunidade vegetal sobre as diferentes classes de solos, permitindo estabelecer limites mais precisos e menos subjetivos entre os compartimentos pedológicos.

No entanto, Lagacherie (2008) adverte que um conjunto de dados cartográficos e topográficos de qualidade é um fator chave para efetivar um Mapeamento Digital de Solos preciso e avaliar a qualidade dos seus resultados. Por fim, ele conclui argumentando que a disponibilidade destes dados tem sido um fator limitante que pode severamente frear os avanços dos Mapeamentos Digitais de Solos.

Segundo Coelho (2010), a Pedometria estabelece relações matemáticas entre classes e propriedades de solos e as variáveis preditoras (variáveis geomorfométricas) para o estudo da distribuição e gênese de solos. A Figura 7 representa esquematicamente a Pedometria em relação a outros ramos da ciência.



Figura 7 – A Pedometria em relação a outros ramos da ciência.
Fonte: Coelho (2010) adaptado de Hengl (2003)

Em geral, os métodos que definem unidades homogêneas, de acordo com um modelo morfológico, tem mostrado um potencial para melhorar a predição de ocorrência das classes de solos, visto que a sua posição na paisagem influencia os processos de formação e os atributos pedológicos (SIRTOLI *et al.*, 2008a). Segundo este autor, o uso de modelos de paisagem, como técnica auxiliar em levantamentos

de solos, constitui uma evolução no entendimento das relações solo-geomorfologia e consequentemente, uma ferramenta importante para identificar e mapear áreas de solos homogêneos.

Os modelos de terreno fornecem informações sobre a topografia, e produtos derivados, tais como a clinografia, que através de histogramas ou áreas de referência permite fazer a comparação com os mapas de solos tradicionais. Tanto as áreas de referência quanto os histogramas precisam de um amplo conhecimento da área de estudo para delinear amostras ou para classificar os solos (VALLADARES e HOTT, 2008).

A grande vantagem do mapeamento digital de solos apontada por Coelho (2010) é a possibilidade de utilizar a modelagem para extrapolar os limites para áreas adjacentes ao mapa utilizado como referência, partindo da premissa que são áreas de mesma fisiografia, resultando em ganho de informações para áreas que não tinham informações alguma das classes de solos.

Como exemplo de aplicação do mapeamento digital de solos a tese de SIRTOLI (2008), além de utilizar apenas as variáveis derivadas do MDE, utilizou variáveis espectrais de imagens de satélite e mapas de geologia. O método de classificação utilizado em seu estudo foi o de Redes Neurais Artificiais (RNAs) para discriminação das classes de solo e seus resultados indicaram que a metodologia é útil para a melhoria da qualidade dos levantamentos preliminares de solos.

Da mesma forma aponta Silveira (2010) em sua tese, na qual utiliza a metodologia das Redes Neurais Artificiais e da tabulação cruzada a fim de obter classes de solos a partir de informações de atributos topográficos primários e secundários.

Crivelenti *et al.* (2009) desenvolveram uma metodologia para mapeamento digital de solos na escala 1:100.000 com a aplicação de técnicas de mineração de dados a descritores de relevo e a dados de mapas geológico e pedológico preexistentes. A partir do MDE, estes autores calcularam os parâmetros geomorfométricos de declividade, curvaturas em planta e perfil, área de contribuição e distância diagonal de drenagem. A matriz que associou esses dados georreferenciados foi analisada por meio de árvores de decisão, no ambiente de aprendizado de máquina Weka, o que gerou um modelo de predição de unidades de mapeamento de solos.

Utilizando-se do modelo logístico Ten Caten (2008) e Ten Caten *et al.* (2009) realizaram mapeamento digital de solos com aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP) que pode ser empregada para estudar as relações entre os fatores de formação do solo, além de possibilitar a simplificação através da redução do número de variáveis que precisam ser manipuladas. Estes autores ainda utilizaram as Regressões Logísticas Múltiplas (RLM) que geram a probabilidade de se encontrar cada uma das classes de solos presentes em uma região de referência, a qual foi mapeada para servir de área de treinamento para os modelos preditivos. Os resultados mostraram a aplicabilidade do uso de Análise de Componentes Principais para redução das variáveis e análise da correlação entre as mesmas e ainda consideraram satisfatórios os resultados do mapeamento.

Coelho (2010) testou e comparou métodos de classificação em estágio único (regressões logísticas múltiplas multinomiais e Bayes) e classificação de decisão em árvore (*Classification and Regression Trees*, J48 e *Logistic Model Trees*) para produção de mapas pedológicos com legenda original e simplificada, com utilização de sistemas de informações geográficas e de variáveis geomorfométricas que integram na área de estudo os municípios de Ijuí, Bozano e parte de Coronel Barros, localizados na unidade geomorfológica do Planalto Meridional, formação Serra Geral, do Estado do Rio Grande do Sul.

Em outro estudo, Chagas (2006) utilizou Redes Neurais Artificiais e de máxima verossimilhança como técnicas de mineração de dados para a predição de classes de solos na região de domínio de mar de morros e de alinhamentos serranos do noroeste do Estado do Rio de Janeiro, com base em conceitos de associações solo-paisagem. A comparação a pontos de observação coletados no campo mostrou que o mapa produzido por redes neurais teve concordância superior (71%) à dos produzidos pela abordagem convencional (53%) e por máxima verossimilhança (51%), o que levou os autores a concluir que a quantificação de atributos do terreno e sua classificação por redes neurais podem aumentar a confiabilidade dos mapeamentos de solos.

A partir de todos estes trabalhos citados, pretendeu-se tomar as suas análises, experiências e considerações acerca do mapeamento digital de solos, para que o mapeamento do rio Pequeno fosse coerente e que pudesse chegar em resultados satisfatórios de acordo com os objetivos propostos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, foram apresentados os materiais utilizados na realização desta dissertação, bem como todos os procedimentos metodológicos que tornaram possível o mapeamento de solos da bacia hidrográfica do rio Pequeno através do cruzamento entre as informações presentes nos atributos topográficos.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a realização desta dissertação de mestrado foram divididos em Softwares e Equipamentos de campo. Os softwares foram os primeiros a serem utilizados em toda a etapa de elaboração e organização tanto das informações bibliográficas quanto metodológicas, enquanto que os equipamentos de campo serão todas as ferramentas utilizadas nas coletas de solo em campo.

3.1.1. Softwares

Para cumprir os objetivos propostos, e tornar possível o desenvolvimento dos procedimentos metodológicos supramencionados, foram utilizados os seguintes softwares:

- a) ESRI ArcGis 9.3 (tabulação cruzada e layout dos mapas)
- b) SAGA 2.0.5. (geração de atributos topográficos)
- c) Global Mapper 13 (conversão de arquivos de imagem e vetor)

3.1.2. Equipamentos de campo

Os equipamentos utilizados nas coletas de solos em campo foram:

- a) Trado holandês (Fotografia 1 e Fotografia 2)
- b) Pedocomparador (Fotografia 3)

- c) Tabela de cores Munsell (MUNSELL COLOR COMPANY, 2000)
- d) GPS de navegação Garmin Map 60CSx



Fotografia 1 – Trado holandês desmontado



Fotografia 2 – Trado Holandês montado



Fotografia 3 – Pedocomparador

3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.2.1. Mapeamento digital de solos a partir de atributos topográficos

Primeiramente foram organizadas todas as informações cartográficas necessárias para a realização deste trabalho. Os dados utilizados na elaboração da carta base (perímetro da bacia do rio Pequeno, curvas de nível e pontos cotados) foram elaborados a partir de cartas topográficas na escala 1:25.000 (curvas com equidistância de 10m), presentes em Paula (2010), na qual o recorte espacial de trabalho foi toda a área de drenagem da baía de Antonina. Com as informações de Curvas de Nível e Pontos cotados, é possível elaborar o Modelo Digital do Terreno (MDT).

A confecção do mapa preliminar de solos a partir da Pedometria, foi feita a partir de variáveis geomorfométricas denominadas de **atributos topográficos primários**: Hipsometria (Z), Declividade (α), Perfil (ϕ) e Plano (ψ) de Curvatura e **atributos topográficos secundários**: Índice de Corrente de Máximo Fluxo (Ω), Índice de Umidade (w) e Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (τ) (MOORE *et al.*, 1993, McBRATNEY *et al.*, 2003 e SILVEIRA, 2010). Todos estes atributos são gerados a partir do MDT da bacia.

Conforme Moore *et al.*, (1993), as variáveis primárias seriam aquelas derivadas diretamente de um modelo do terreno; as secundárias são as variáveis que envolvem a combinação de variáveis primárias (geralmente índices geomorfométricos).

O uso de Modelos Digitais do Terreno na compreensão e identificação da distribuição dos solos, contribui como importante ferramenta para delimitar unidades preliminares de mapeamento dos solos, utilizadas no suporte aos trabalhos de levantamentos de solos na fase de campo e apoio à cartografia pedológica. Sua importância está relacionada à necessidade de introduzir na pesquisa cartográfica dos solos elementos que possam auxiliar os procedimentos básicos de delimitação das unidades, permitindo-se a redução da subjetividade nessa tarefa (NANNI e ROCHA, 1997 *apud* SILVEIRA, 2010).

Rocha (2000) destaca que um MDT gerado em uma estrutura de grade retangular regular é o resultado de um método matemático de interpolação automatizado de valores altimétricos que tem o objetivo de representar a superfície

de um terreno. Para tanto, foram criados inúmeros programas de interpolação, os quais são classificados em dois tipos de acordo com os métodos matemáticos utilizados, sendo um que utiliza superfícies e outro que utiliza uma malha de pontos.

Este autor ainda destaca que as principais aplicações de um MDT no geoprocessamento são a geração de isolinhas, separação em classes, definição de classes de declividade, orientação de vertentes, extração de padrões, cálculos de área, volume e menor trajeto, geração de perfis e vistas em diferentes perspectivas, o que facilita a visão de determinados pontos em determinados ângulos, e a ortorectificação de produtos de sensoriamento remoto.

Silveira, *et al.* (2012) também destacam que através de atributos topográficos é possível identificar unidades homogêneas da paisagem, apoiado em modelos morfológicos do relevo calculados a partir de um MDT de grade retangular. Apresenta potencial na predição de mapeamento de solos, visto que a posição ocupada pelos solos nas vertentes influencia nos processos pedogenéticos. Desse modo, a aplicação de atributos topográficos pode ser empregada na distinção de classes pedológicas.

Nesta dissertação, o MDT foi gerado a partir de ferramentas de geoprocessamento com o auxílio do software ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009), em especial a ferramenta *Topo to Raster*, que interpola uma superfície hidrologicamente correta a partir de polígonos, linhas e pontos, disponível no módulo *Spacial Analyst*, deste software. Os atributos topográficos primários foram gerados neste mesmo *software* e os secundários foram gerados no SAGA 2.0.5. (SAGA, 1999).

As operações usadas para se chegar nos atributos topográficos foram executadas por meio de uma janela com nove nodos, conforme ilustra a Figura 8. Esse método consiste em calcular os parâmetros de uma célula central e seus vizinhos em uma janela de oito células que se deslocam 3x3, cujo objetivo dessa operação é obter o cálculo dos atributos topográficos (McBRATNEY *et al.*, 2003 e SILVEIRA, 2010).

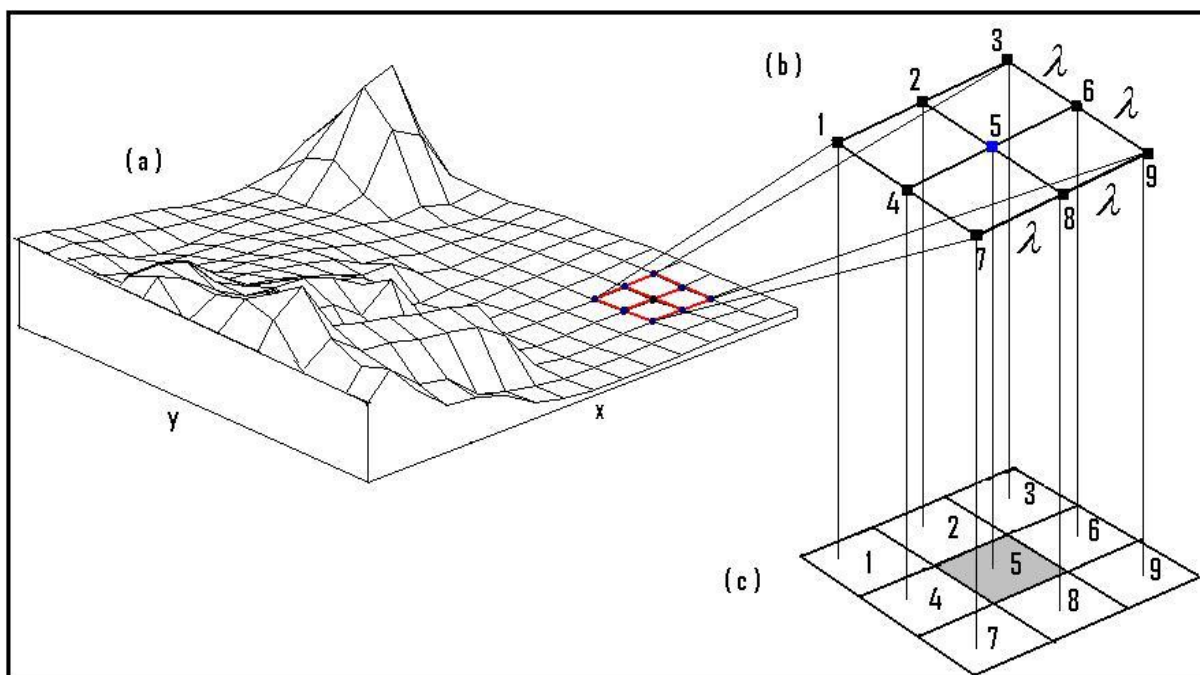


Figura 8 – (a) Grade regular da superfície do solo; (b) Janela com nove nodos; (c) Janela com nove *pixels*.
Fonte: Silveira (2010)

Para tanto, é executada uma varredura com essa janela, sobre o conjunto total de dados (Figura 8-a) que representam a área estudada. Observa-se na Figura 8-b que a largura, ou espaçamento, da grade é de λ metros. A Figura 8-c mostra a representação da grade na forma matricial. Isto é, cada ponto da grade é transformado em um *pixel*. Cada *pixel* possui um valor correspondente à elevação do ponto e uma largura de λ metros (SILVEIRA, 2010). De posse dessa informação os atributos topográficos primários e secundários puderam ser definidos usando um pixel de 10m.

3.2.2. Atributos topográficos primários

Os quatro atributos topográficos primários, são gerados diretamente do Modelo Digital do Terreno. Seguindo os parâmetros de Moore *et al.* (1993), McBratney *et al.* (2003), Sirtoli (2008), Silveira (2010), Silveira *et al.* (2012) e Silveira *et al.* (2013).

Pode-se destacar que a **Hipsometria** (Z) de uma bacia hidrográfica permite que se analise a variação altimétrica do seu relevo a partir das informações planimétricas e altimétricas presentes (SIRTOLI, 2008).

A discretização dos valores hipsométricos levou em conta agrupamentos de curvas de nível nas quais representam a variação da altitude, de acordo com os valores apresentadas no histograma das classes. Deste modo, foram selecionadas seis classes que evidenciassem as diferenças altimétricas da bacia, sendo que os valores em metros (m) das classes são: 5 a 30, 30 a 150, 150 a 350, 350 a 500, 500 a 650 e 650 a 845.

A **Clinografia** (α) (declividade/aclividade), segundo os autores supracitados nesta sessão, pode ser considerada como a inclinação das vertentes, e com isso definirá os locais com maiores riscos de ocorrerem processos erosivos intensificados, ou locais onde há uma maior probabilidade de processos pedogenéticos ocorrerem.

Construído a partir da análise das distâncias entre curvas de nível, a clinografia é um tema derivado, que representa, de forma contínua, a inclinação e as formas do relevo. Este tema permite inferir informações como formas da paisagem, erosão, potencialidades para o uso agrícola, restrições para ocupação urbana, manejo e práticas conservacionistas (SANTOS, 2004).

Conforme destaca Santos (2004), pressupõe-se que a área que pertence a uma determinada classe, representada em ângulo de inclinação ou porcentagem de clinografia, possui certa homogeneidade que responde de maneira semelhante frente a uma atividade ou pressão humana. Este autor defende a ideia que um mapa clinográfico é produzido pela “transformação dos dados vetoriais das curvas de nível em dados matriciais que, por sua vez, são interpolados em softwares específicos para a geração do MDT”, processo este que foi utilizado neste trabalho.

Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), as Fases do Relevo “qualificam condições de declividade, comprimento de encostas e configuração superficial dos terrenos, que afetam as formas de modelado (formas topográficas) de áreas de ocorrência das unidades de solo”. Segundo este Sistema, as distinções de classes clinográficas são empregadas para prover informação sobre praticabilidade de emprego de equipamentos agrícolas, mormente os mecanizados, e facilitar inferências sobre suscetibilidade dos solos à erosão.

As classes utilizadas na discretização da Clinografia foram separadas de acordo com as seguintes classes de relevo (EMBRAPA, 2006) presentes no Quadro 2.

CLASSE CLINOGRÁFICA	TIPO DE RELEVO
0 a 3 %	Plano
3 a 8 %	Suave Ondulado
8 a 20 %	Ondulado
20 a 45 %	Forte Ondulado
45 a 75%	Montanhoso
75% <	Escarpado

Quadro 2 – Classes Clinográficas
Fonte: EMBRAPA (2006)

Essas classes foram escolhidas pois a bacia do rio Pequeno está inserida em uma área onde temos planícies aluviais com relevos planos e suave ondulados e serras, com relevos montanhosos e até mesmo escarpados.

Com relação aos mapas de formas de vertentes, podemos ter o **Perfil de Curvatura** (ϕ), que representa a taxa de variação da declividade na direção da orientação da vertente e o **Plano de Curvatura** (ψ) pode ser considerado como uma taxa de variação da declividade na direção ortogonal à da orientação (JARENTCHUK JR., 2009). A Figura 9 ilustra os nove tipos de vertentes, segundo o Perfil e Plano de Curvatura.

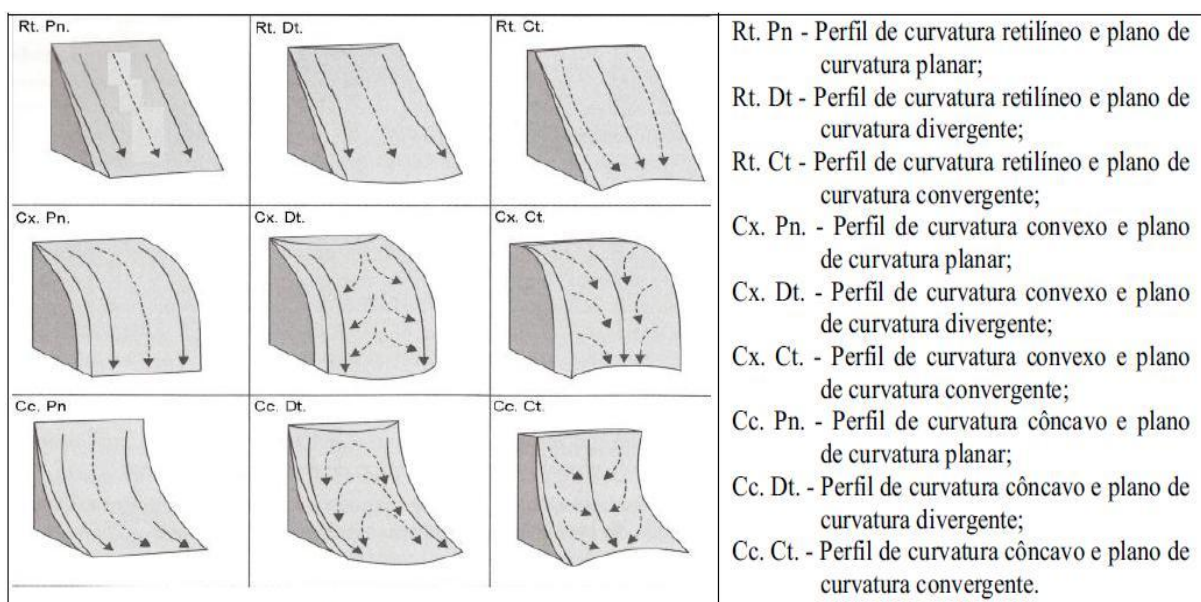


Figura 9 – Fluxo da água no plano de curvatura (setas pontilhadas) e fluxo da água no perfil da curvatura das vertentes (setas contínuas).

Fonte: Silveira (2010), adaptado de Hugget (1975)

Segundo Jarentchuk Jr. (2009) os mapas de forma das vertentes representam as curvaturas vertical e horizontal da superfície do terreno, as quais

regem o comportamento do escoamento superficial da água e seu potencial erosivo, em função das características de concavidade, convexidade, convergência e divergência. A confecção desses dois produtos cartográficos foi possível a partir da ferramenta *Curvature* disponível também no módulo *Spatial Analyst* do ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009).

A curvatura é definida por este software em função da clinografia do terreno, de maneira que a Perfil de Curvatura ou curvatura vertical seja determinada pela variação da declividade no sentido de máxima inclinação. Já o Plano de Curvatura ou curvatura horizontal é a variação da declividade no sentido perpendicular à máxima inclinação (JARENTCHUCK JR., 2009). Para Valeriano (2003) o Perfil de curvatura refere-se à curvatura da superfície na direção do declive, para a qual os valores negativos referem-se a vertentes convexas, positivos a vertentes côncavas e valores nulos a vertentes retilíneas. Conforme este autor, o Plano de Curvatura pode ser entendido como a curvatura da superfície perpendicular à direção do declive, para a qual os valores positivos referem-se a vertentes divergentes, negativos a vertentes convergentes e valores nulos a vertentes planares.

Portanto, estas variáveis estão relacionadas aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade e desempenham importante papel sobre os processos de pedogênese (VALERIANO, 2003).

Para a discretização do Plano de Curvatura no histograma, foram utilizados valores superiores a 0,05 para representar segmentos vertentes côncavos, inferior a -0,05 para convexos e entre -0,05 a 0,05 segmentos retilíneos. Os intervalos entre as classes foram feitos de modo semelhante aos critérios de Valeriano e Carvalho Júnior (2003) e que também foram seguidos por Silveira (2010). Segundo este autor, determinam-se os intervalos com “base na apreciação visual dos mapas resultantes, de modo que a distribuição territorial das classes apresentasse um indicador diferenciado entre os tipos de relevo descritos”. Para o rio Pequeno, foram feitos inúmeros testes, com inúmeros intervalos diferenciados, até chegar no valor supramencionado.

O perfil de curvatura segue a mesma metodologia do atributo Plano, cujos valores superiores a 0,05 para representar segmentos vertentes côncavos, inferior a -0,05 para convexos e entre -0,05 a 0,05 segmentos retilíneos. Seguindo a

metodologia de discretização de Silveira (2010) “esses parâmetros foram determinados obedecendo às características topográficas da área de estudo”.

3.2.3. Atributos topográficos secundários

Os atributos secundários considerados na presente dissertação baseados em Moore *et al.* (2003), são os parâmetros relacionados a processos de transportes de sedimentos e a movimentação da água superficial e subsuperficial no solo. São eles: Índice de Corrente de Máximo Fluxo (Ω); Índice de Umidade (w) e Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (τ). Segundo Silveira (2010) nos atributos topográficos secundários a “discretização das classes foi orientada pela morfologia do relevo da área e nas unidades de mapeamento de solos existentes. Os intervalos apresentam subjetividade na sua separação e os valores apresentados nos índices são adimensionais”.

O **Índice de Corrente de Máximo Fluxo** (Ω) é a mensuração do poder erosivo da água corrente, com base no pressuposto de que a descarga é proporcional a acumulação de fluxo de montante. Prediz a erosão nas áreas de perfil convexo (aceleração do fluxo) e deposição em áreas de perfil côncavo (redução da velocidade de fluxo), (WILSON e GALLANT, 2000 *apud* SILVEIRA, 2010). Pode ser entendida segundo a Equação 1:

$$\Omega = A_c \cdot \tan \beta \quad (1)$$

Onde: A_c é a Área específica de Contribuição para o ponto central da janela (Figura 8-c), isto é: $A_c = (3\lambda \times 3\lambda)$. Ou seja, a A_c é definida como o número de células, ou área, que contribui com o volume total de água, de uma determinada célula, é a área acumulada a montante por unidade de largura, transversal ao sentido do fluxo (A Figura 10 representa o método Deterministic 8, ou D8, que é utilizado no software SAGA na geração da A_c). β é a Clinografia da célula.

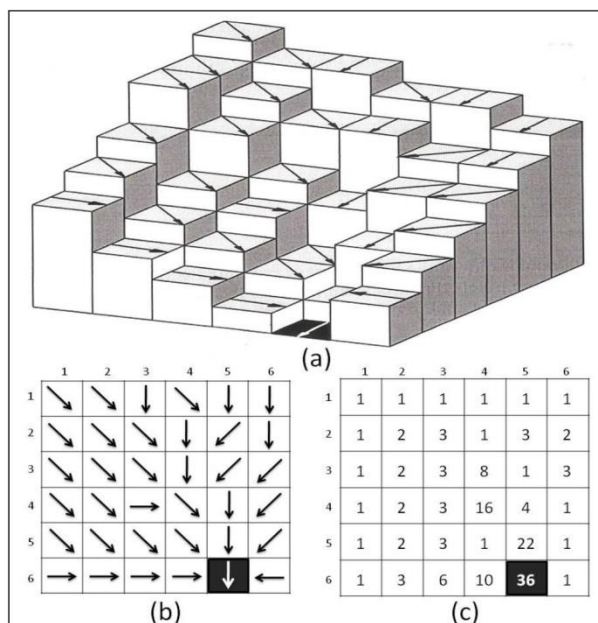


Figura 10 – (a) Modelo digital; (b) Direção do fluxo; (c) acumulação do fluxo ou área de contribuição
 FONTE: SILVEIRA (2010) adaptado de TRAUTH (2007)

O **Índice Topográfico de Umidade** (w), podendo ser encontrado pelo termo (TWI), segundo Sirtoli (2008) é usado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação superficial e conteúdo de água nas paisagens. Para Moore *et al.* (2003) este índice ainda demonstra os efeitos do relevo na localização e extensão das áreas de acumulação de água.

Para Silveira (2010) tem aplicação para a separação dos solos com caráter hidromórfico, que ocorrem em relevo plano, de outras classes de solos que ocorrem em área planas e suave onduladas. Sirtoli (2008) ainda destaca que o Índice Topográfico de Umidade é definido como uma função da declividade e da área de contribuição por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo. Em estudo realizado em uma topossequência no Colorado, Moore *et al.* (1993) verificaram que o Índice Topográfico de Umidade e a Clinografia foram os atributos do relevo que mais se correlacionaram com os atributos medidos no solo. Tal índice é obtido conforme a Equação 2:

$$w = \ln(Ac/\tan\beta) \quad (2)$$

Esta equação mostra que o índice de umidade é função apenas da declividade e varia com as funções tangentes e logaritmo natural. Assim, esse índice está sujeito à seguinte restrição: $0^\circ < \beta < 90^\circ$. Analisando a equação, percebe-se

que quando a declividade aproxima de 0°, o limite dessa função tende para infinito e, quando declividade aproxima de 90°, o limite tende para zero. O significado físico desse comportamento é que quanto mais plano for o relevo, mais úmido (alto valor de umidade) o solo apresenta. Essa característica do índice de umidade possibilita a identificação de solos com caráter hidromórfico (SILVEIRA, 2010).

O **Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos** (τ), segundo Silveira (2010), é entendido a partir a área de contribuição específica e a clinografia, conforme a Equação (3):

$$\tau = (Ac/22.13)^{0,6} \cdot (\text{sen}\beta/0,0896)^{1,3} \quad (3)$$

Este índice mensura a capacidade de transporte de sedimentos, pois quanto maior a declividade do terreno e mais alto valor da área de contribuição, maior será a capacidade de transporte de sedimentos e consequentemente os solos formados nessa condição serão menos desenvolvidos.

3.2.4. Tabulação cruzada

A técnica da Tabulação Cruzada é empregada na integração das variáveis é por superposição de mapas ou álgebra de mapas (TOMLIN, 1983). Esta técnica indica o conjunto de procedimentos de análise espacial em geoprocessamento que produz novos dados a partir de funções de manipulação aplicadas a um ou mais mapas (SILVEIRA *et al.*, 2012).

Conforme aponta Silveira (2010) esse método se constitui “na sobreposição das classes dos atributos topográficos na forma de matrizes, nas quais são executadas operações de cálculo dentro de um ambiente de SIG, considerando pesos atribuídos”. Da mesma forma, Neto (2004) coloca que uma Tabulação Cruzada é entendida como uma tabela de informações de duas ou mais variáveis que são consideradas conjuntamente.

Massad *et al.* (2004) colocam que quando se deseja descrever uma relação entre duas variáveis qualitativas, os dados podem ser facilmente resumidos através de uma tabela cruzada ou de contingência. Eles destacam que este método se dá em uma tabela retangular, com linhas indicadoras para cada categoria da variável X,

e colunas indicadoras para cada categoria da variável Y. Portanto existe uma célula na tabela para qualquer combinação possível de valores de X e de Y, sendo cada combinação representada por (x,y).

Esses autores explicam que a partir da Tabulação Cruzada, pode-se calcular a frequência com que cada combinação (x,y) ocorre, e este número é colocado na respectiva célula. Estas tabelas são denominadas de acordo com os números de linhas e de colunas que possuem. Eles concluem argumentando que a soma dos valores de cada linha e em cada coluna resulta nos totais marginais e fornece informação sobre as categorias de cada variável isoladamente. A soma dos totais marginais das linhas ou das colunas fornece o total geral, que é o número total de observações no conjunto de dados bivariados.

Na determinação de unidades preliminares de solos por tabulação cruzada, Sirtoli *et al.* (2008b) demonstraram a utilização dos atributos topográficos secundários: índices de umidade, índice de corrente de máximo fluxo e índice de capacidade de transporte de sedimentos, aplicados no mapeamento de unidades preliminares de solo (pedoformas).

Contudo, Silveira (2010) coloca que “se faz necessário discretizar os atributos topográficos, para que a partir dessas classes seja realizada a sobreposição das variáveis. Os intervalos adotados para separação das classes são arbitrários e subjetivos, além de que necessitam de uma avaliação preliminar das relações entre as classes dos atributos topográficos com a distribuição das classes de solos existentes”. Porém ele destaca que variáveis se mostraram suficientes e adequadas na predição por tabulação cruzada porque nesse método os atributos são discretizados e as classes são preliminarmente comparadas com mapas de solos pré-existentes, fato que oferece informações prévias da relevância de cada atributo no processo de atribuição de pesos.

3.2.4.1. Método de integração de atributos topográficos

Esta etapa foi baseada nos critérios apontados por Silveira (2010) e Silveira *et al.* (2012), onde foram primeiramente atribuídos pesos às classes de cada um dos atributos utilizados, considerando o potencial de atuação da morfogênese. Este

procedimento foi realizado no *software* ArcGis 9.3.1 com o módulo *Spatial Analyst* e os valores podem ser comparados no Quadro 3.

PESOS / ATRIBUTOS	w	Ω	α	τ
1	< 7	< 30	< 3	< 0,004
2	7 a 8	30 a 60	3 a 8	0,004 a 0,02
3	8 a 9	60 a 300	8 a 20	0,02 a 0,05
4	9 a 10	300 <	20 a 45	0,05 a 0,08
5	10 a 11	-----	45 a 75	0,08 <
6	11 <	-----	75 <	-----

Quadro 3 – Síntese da divisão dos pesos das classes dos atributos topográficos

Para cada atributo foram feitos testes com número de intervalos variáveis, analisando-se sempre os histogramas de acordo com as distribuições dos pixels, bem como sempre foi observado às respostas das divisões das classes em relação às curvas de nível, a fim de pudesse chegar em uma representação confiável de cada atributo para a bacia do rio Pequeno. Também foram consultados os mapeamentos preexistentes presentes na área, a fim de se entender a distribuição dos tipos de solos que são encontrados na região.

A matriz representada no Quadro 4, se refere aos valores dos índices Topográfico de Umidade e Corrente de Máximo Fluxo. Para o primeiro, foram considerados seis intervalos na qual os maiores pesos representam áreas com maior acúmulo de umidade e menores valores para as áreas melhor drenadas. Essa divisão em seis intervalos foi escolhida pois representou melhor esse índice para a bacia do rio Pequeno. Já para o segundo Índice, os pesos são crescentes em função do aumento na corrente de fluxo e para a bacia em questão, sendo que para esta bacia, foram escolhidos quatro intervalos.

CLASSES		TOPOGRÁFICO DE UMIDADE					
		w 6	w 5	w 4	w 3	w 2	w 1
CORRENTE DE MÁXIMO FLUXO	Ω 1	16	15	14	13	12	11
	Ω 2	26	25	24	23	22	21
	Ω 3	36	35	34	33	32	31
	Ω 4	46	45	44	43	42	41

Quadro 4 – Matriz de tabulação dos atributos Topográfico de Umidade com Corrente de Máximo Fluxo

Esta matriz de tabulação possui 24 combinações, sendo que todas aparecem na bacia do rio Pequeno. As combinações resultantes foram incorporadas em quatro agrupamentos, de acordo com características Geomorfológicas e Hidrológicas, conforme o Quadro 5.

AGRUPAMENTO	COMBINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DE VERTENTE	SATURAÇÃO E ESTAGNAÇÃO HÍDRICA
1	14, 15, 16, 25, 26, 36 e 46	Áreas aplainadas e mal drenadas em terço inferior	Alta
2	11, 12, 13, 21, 22, 23, 24, 33, 34 e 35	Áreas de terço médio	Média
3	31, 32, 44 e 45	Áreas de terço superior	Baixa
4	41, 42 e 43	Áreas escarpadas de terço superior	Muito baixa

Quadro 5 – Síntese das características resultantes da matriz de tabulação dos atributos Topográfico de Umidade com Corrente de Máximo Fluxo

O agrupamento 1, se refere a porções da paisagem que possuem características de alta saturação e estagnação hídrica. São porções que coincidem com as planícies aluviais (Figura 4). Essas zonas podem indicar a presença de solos hidromórficos. O agrupamento de número 2 se refere às porções onde existe uma saturação e estagnação hídrica menor que a do agrupamento 1, sendo que já não é possível encontrar condições para se formar solos hidromórficos. São encontrados em porções coluvionares e em algumas partes em áreas serranas de diversas litologias. O terceiro agrupamento possui uma baixa saturação e estagnação hídrica sendo encontrado em áreas serranas. Por fim, o agrupamento 4 se refere às áreas de menor saturação e estagnação hídrica, sendo estes valores, quase nulos. São as porções escarpadas da Serra do Mar, sendo encontradas na sua maior parte dentro do Complexo Gnáissico-Migmatítico.

A segunda matriz de tabulação, representada no Quadro 6, apresenta as classes dos pesos dos atributos Capacidade de Transporte de Sedimentos e de Clinografia. O primeiro foi dividido em cinco intervalos, sendo que os maiores pesos representam áreas com potencial erosivo grande e os valores menores para áreas de deposição. Já os pesos das classes de Clinografia são crescentes em função do aumento do seu valor em %.

CLASSES		CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS				
		$\tau 1$	$\tau 2$	$\tau 3$	$\tau 4$	$\tau 5$
CLINOGRÁFIA	$\alpha 1$	11	12	13	14	15
	$\alpha 2$	21	22	23	24	25
	$\alpha 3$	31	32	33	34	35
	$\alpha 4$	41	42	43	44	45
	$\alpha 5$	51	52	53	54	55
	$\alpha 6$	61	62	63	64	65

Quadro 6 – Matriz de tabulação dos atributos Capacidade de Transporte de Sedimentos com Clinografia

Esta matriz de tabulação possui 30 combinações, todas presentes na bacia do rio Pequeno. As combinações resultantes foram agrupadas de acordo com critérios Geomorfológicos (relação pedogênese e morfogênese), ou seja áreas onde ocorrem processos deposicionais e áreas onde predominam os processos erosivos, pois esses dois atributos podem indicar ambos os processos (SIRTOLI, 2008 e SILVEIRA, 2010), conforme o Quadro 7.

AGRUPAMENTO	COMBINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DE VERTENTE	RELAÇÃO PEDOGÊNESE E MORFOGÊNESE
1	11, 12, 13, 21, 22, 23 e 31	Áreas planas (planícies)	Somente processos deposicionais
2	14, 15, 24, 32, 33, 34, 41, 42, 43 e 51	Áreas de terço médio com declives intermediários	Processos erosivos atuantes em áreas de colúvio
3	25, 35, 44, 45, 52, 53, 54, 61, 62 e 63	Áreas de terço superior com fortes declives	Predominância de processos erosivos
4	55, 64 e 65	Áreas escarpadas de Serra	Somente processos erosivos

Quadro 7 – Síntese das características resultantes da matriz de tabulação dos atributos Capacidade de Transporte de Sedimentos e de Clinografia

Esta matriz de tabulação resultou em quatro agrupamentos, da mesma forma que a primeira (Quadro 4). O primeiro agrupamento foi definido a partir das áreas mais planas da bacia, coincidindo com as planícies aluviais e sedimentos cenozoicos (Figura 4). São áreas onde os processos deposicionais predominam em função dos processos erosivos. O agrupamento 2 indica áreas onde existem processos erosivos de intensidade variando de baixa a intermediária em áreas colúvies. O terceiro agrupamento se refere às áreas onde existe uma predominância

de processos erosivos em função dos deposicionais. E por ultimo, o agrupamento 4 foi escolhido para áreas onde apenas ocorrem processos erosivos.

A partir das informações presentes nos Quadro 4 e Quadro 6, foi feita a matriz de tabulação final entre as duas. Existem no total 16 combinações, contudo, para a bacia em questão foram encontrados 15, conforme o Quadro 8. Já O Quadro 9 sintetiza as informações de combinação e características de acordo com essa ultima tabulação. Cabe destacar que a combinação 21 não se enquadrrou no Grupo 1, pois mesmo que algumas áreas desta combinação estejam na planície, outras áreas estão distribuídas em porções da vertente, bem como alguns topos aplainados. Já a combinação 31 foi enquadrada no Grupo 1 por se localizar majoritariamente em áreas de planície da bacia.

CLASSES		α e τ			
		1	2	3	4
Ω e W	1	11	12	13	14
	2	21	22	23	24
	3	31	32	33	34
	4	41	42	43	44

Quadro 8 – Matriz de tabulação para obtenção das Unidades Geomórficas

AGRUPAMENTO	COMBINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS
1	11, 12 e 31	Áreas planas e úmidas
2	13, 21, 22, 23, 32, 41 e 42	Áreas de terço médio de vertente com declives intermediários
3	14, 33 e 43	Áreas de terço superior com fortes declives
4	34 e 44	Áreas escarpadas de Serra

Quadro 9 – Síntese das características das Unidades Geomórficas

De acordo com os estudos de Silveira (2010), esses agrupamentos representam as Unidades Geomórficas de paisagem, e que para Irvin *et al.* (1997) expressam a dinâmica do ambiente em função da morfologia do relevo. A partir destas informações é possível fazer uma relação com os possíveis tipos de solos a serem encontrados em cada uma dessas unidades.

Através da interpretação dessas Unidades pode-se fazer um mapeamento preliminar de solos na bacia do rio Pequeno. Por meio da identificação de características resultantes do cruzamento entre atributos do relevo, os solos podem ser agrupados em unidades preliminares de mapeamento, nos quais acreditam conter solos similares (HUDSON, 1992). Portanto, a partir do Quadro 8 foi possível é possível dividir as Unidades Geomórficas do rio Pequeno em quatro grupos:

- a) Grupo 1: Solos com características hidromórficas e flúvicas;
- b) Grupo 2: Solos oxidados de terços médios a superiores de vertente com profundidades variando de rasas a médias;
- c) Grupo 3: Solos de profundidade rasa de terços superiores de encosta e
- d) Grupo 4: Solos muito rasos em porções escarpadas da Serra do Mar.

Solos com profundidades médias, foram considerados maiores que 50cm de Horizonte B, rasas foram considerados aqueles que possuem um Horizonte B com até 50cm e muito rasos para aqueles que não possuem Horizonte B. Solos com profundidades médias, foram considerados maiores que 50cm de Horizonte B, rasas foram considerados aqueles que possuem um Horizonte B com até 50cm e muito rasos para aqueles que não possuem Horizonte B

Cabe salientar que todas as escolhas dos agrupamentos dos valores resultantes das tabulações cruzadas, foram feitas a partir de análises dos mapeamentos pedológicos preexistentes na região, bem como as características pedológicas das classes encontradas. Por fim, para a escolha do agrupamento, foi feita uma conferência de todas as combinações com as curvas de nível em sobreposição.

3.2.5. Mapeamentos pedológicos preexistentes na bacia do rio Pequeno

Para este trabalho foram consultados três mapeamentos de solos em escalas diferentes que englobam toda a área da bacia hidrográfica do rio Pequeno. Dois deles são mapeamentos da Embrapa em escalas 1:600.000 (EMBRAPA, 1984) e 1:250.000 (EMBRAPA, 2008). O terceiro mapeamento é o da área de drenagem

da baía de Antonina, Santos et al. (2009) sendo que este se encontra na escala 1:50.000 e que foi o escolhido para servir como parâmetro de comparação.

3.2.5.1. Mapeamentos de Solos do Estado do Paraná da Embrapa

O primeiro mapeamento consultado foi o **Mapa de levantamento e reconhecimento dos solos do estado do Paraná** (EMBRAPA, 1984) na escala 1:600.000, disponível no site do Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG) em formato vetorial. Neste, encontram-se em sua maior parte Cambissolos Háplicos (CX) e até mesmo Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA).

O segundo consultado, foi a **Carta de Solos do Estado do Paraná** (EMBRAPA, 2008) na escala 1:250.000, em formato de figura (.jpeg), na qual foi georeferenciado e vetorizadas para a abrangência da área do rio Pequeno. Neste mapeamento, com maior detalhamento com relação ao anterior, encontram-se praticamente em toda bacia Cambissolos Háplicos (CX), com exceção de uma pequena porção da planície litorânea na porção sul da bacia cuja ocorrência é de Cambissolos Flúvicos (CY). Ambos os mapeamentos da Embrapa para a bacia do rio Pequeno estão na Figura 11.

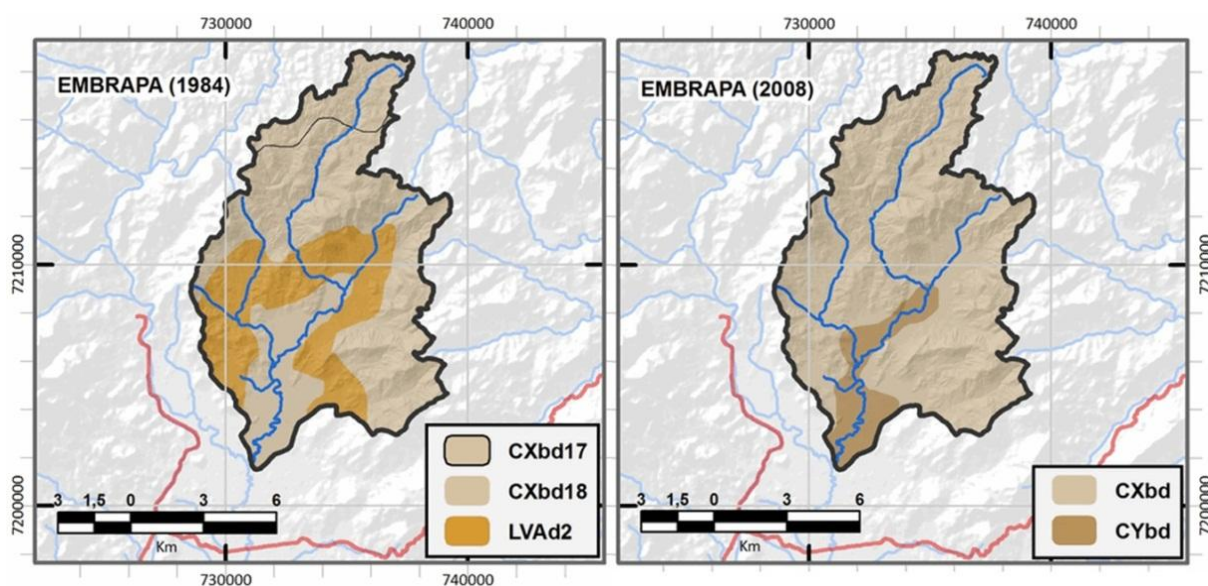


Figura 11 – Mapeamentos de Solos do Estado do Paraná da Embrapa 1:600.000 e 1:250.000 (1984 e 2008)

3.2.5.2. Mapeamento de Solos da área de drenagem da baía de Antonina

O terceiro mapeamento, é a **Confecção da Carta de Pedologia da Área de Drenagem da Baía de Antonina** (PAULA e SANTOS, 2008) na escala 1:50.000, publicado em Santos *et al.* (2009) e presente também em Paula (2010).

A Figura 12 apresenta o mapeamento preexistente para a bacia do rio Pequeno, presente em Santos *et al.* (2009), bem como foram encontradas as seguintes classes de solos (Quadro 10):

CLASSE DE SOLO 2º NÍVEL CATEGÓRICO (EMBRAPA, 2006)	CÓDIGO
Cambissolos Háplicos	CX
Associação de Cambissolos Háplicos com Neossolos Litólicos	CX + RL
Associação de Cambissolos Háplicos com Argissolos Vermelho-Amarelos	CX + PVA
Associação de Cambissolos Háplicos com Latossolos Vermelho-Amarelos	CX + LVA
Cambissolos Flúvicos	CY
Gleissolos Háplicos	GX
Associação de Gleissolos Háplicos com Cambissolos Flúvicos	GX + CY
Associação de Gleissolos Háplicos com Neossolos Flúvicos	GX + RY
Neossolos Litólicos	RL

Quadro 10 – Classes de solos encontradas na bacia do rio Pequeno
Fonte: Paula e Santos (2008)

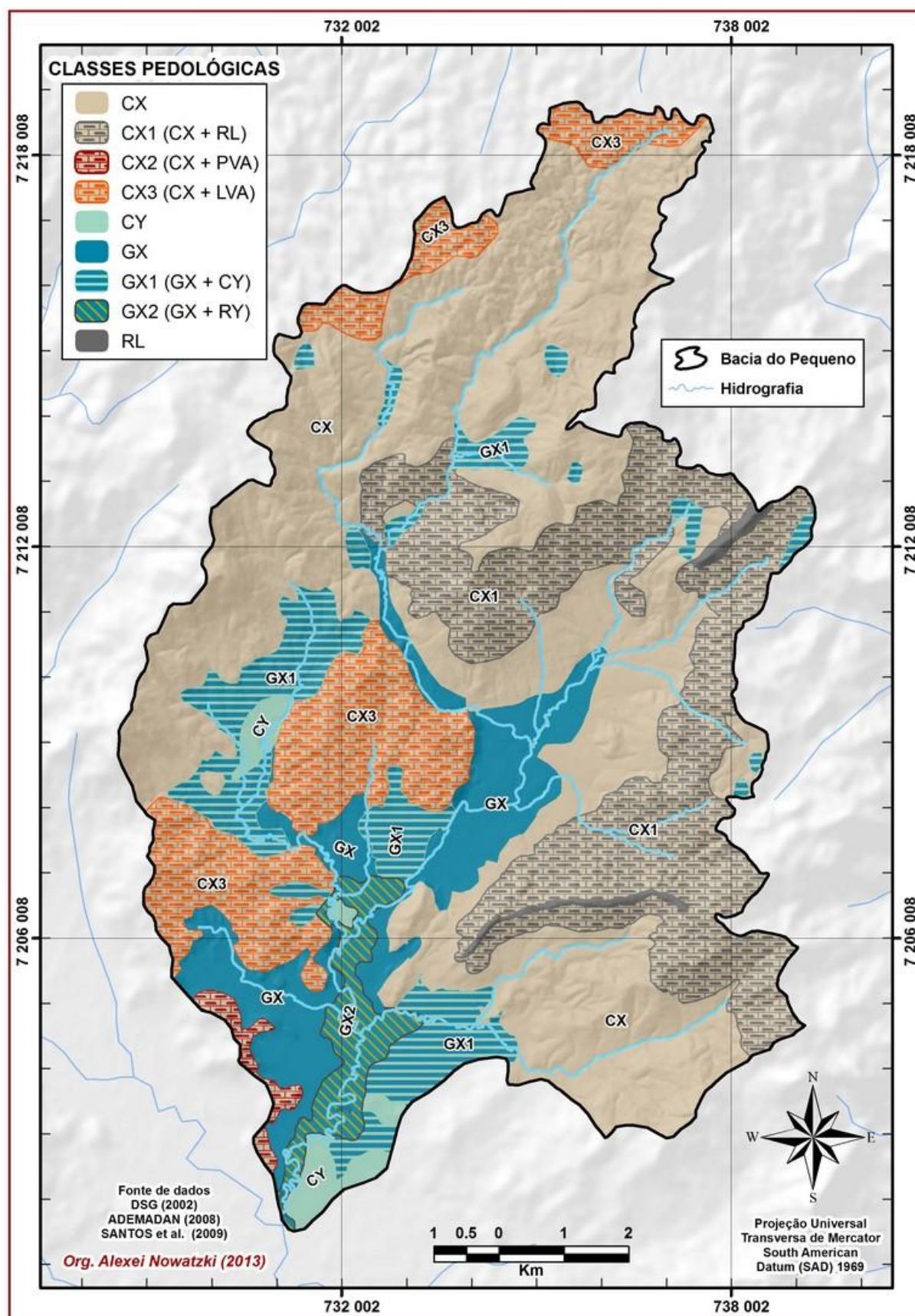


Figura 12 – Mapeamento pedológico da bacia hidrográfica do rio Pequeno
Adaptado de: Santos *et al.* (2009)

Nota-se que nos três mapeamentos analisados, predominam Cambissolos, sendo que no mapeamento de Santos *et al.* (2009), estes solos aparecem também em associação com outros solos. Como no caso dos CX + LVA (Associação de Cambissolos Háplicos com Latossolos Vermelho-Amarelos) em que estes aparecem em porções mais aplainadas de terços superiores de vertentes. Já os CX + RL (Associação de Cambissolos Háplicos com Neossolos Litólicos) estão localizados em porções com valores mais altos de clinografia.

No caso dos Gleissolos Háplicos, estes, quando em associação com outras classes, aparecem juntamente com solos que possuem caráter flúvico, como no caso dos Neossolos Flúvicos e dos Cambissolos Flúvicos.

Portanto, este mapeamento por ser o mais detalhado da área, foi utilizado como parâmetro de comparação com as classes de solos geradas através do método da tabulação cruzada. Para tanto, as classes de solos de Santos *et al.* (2009), foram agrupadas em quatro grandes grupos, em função de características pedogenéticas encontradas em Embrapa (2006), conforme o Quadro 11.

CLASSE DE SOLO SANTOS <i>et al.</i> (2009)	AGRUPAMENTO PEDOLÓGICO
Cambissolos Flúvicos Gleissolos Háplicos Gleissolos Háplicos + Cambissolos Flúvicos Gleissolos Háplicos + Neossolos Flúvicos	Grupo 1
Cambissolos Háplicos Cambissolos Háplicos + Argissolos Vermelho-Amarelos Cambissolos Háplicos + Latossolos Vermelho-Amarelos	Grupo 2
Neossolos Litólicos Cambissolos Háplicos + Neossolos Litólicos	Grupo 3

Quadro 11 – Classes de solos agrupadas em função de características morfológicas semelhantes

Os Neossolos Litólicos (RL) e os Cambissolos Háplicos (CX) associados aos RL foram agrupados como “Grupo 3”, pois conforme Embrapa (2006), até mesmo em um RL admite-se um horizonte B em início de formação, cuja espessura não satisfaz a qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. De modo geral, os solos deste grupo, são solos rasos, pouco desenvolvidos.

A classe “Grupo 2” foi designada para os Cambissolos Háplicos (CX), sendo estes solos pouco desenvolvidos e possuem horizonte B incipiente. Quando os CX que aparecem associados tanto com Argissolos Vermelho-Amarelos quanto com Latossolos Vermelho-Amarelos, quer dizer que estão em estágios mais avançados de evolução pedológica, tendo um B textural para os Argissolos e um B Latossólico para os Latossolos (EMBRAPA, 2006). Por conseguinte, estas duas associações foram consideradas pertencentes ao Grupo 2, pois, os atributos topográficos desta bacia não foram eficientes em diferenciar os solos mais evoluídos dos menos evoluídos.

Por fim, os Cambissolos Flúvicos, Gleissolos Háplicos, Associação de Gleissolos Háplicos + Cambissolos Flúvicos, Associação de Gleissolos Háplicos + Neossolos Flúvicos foram enquadrados na classe de “Grupo 1”, por apresentarem ou forte influência de sedimentos de natureza aluvionar (EMBRAPA, 2006) no caso dos flúvicos, ou Hidromorfia que são

“condições naturais se encontra saturado por água, permanentemente ou em determinado período do ano, independente de sua drenagem atual e que, em virtude do processo de sua formação, apresenta, comumente, dentro de 50 (cinquenta) centímetros a partir da superfície, cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas e/ou cores pretas resultantes do acúmulo de matéria orgânica (PARANÁ e BRASIL, 2008).

O resultado desse agrupamento está expresso na Figura 13, na qual diferencia os solos presentes nos grupos 1, 2 e 3. Os cálculos de área destes grupos se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 – Cálculo de área dos agrupamentos pedológicos

AGRUPAMENTO PEDOLÓGICO	ÁREA (KM²)	ÁREA (%)
1	25,8	22,9
2	63,6	56,4
3	23,4	20,7
TOTAL	112,8	100,0

De acordo com esta tabela, o grupo predominante desta bacia é o Grupo 1, que engloba em sua maioria os Cambissolos, ocupando pouco mais da metade do

valor total. Já os Grupos 1 e 3 tem um valor de área parecido, ficando ambos com aproximadamente 20%.

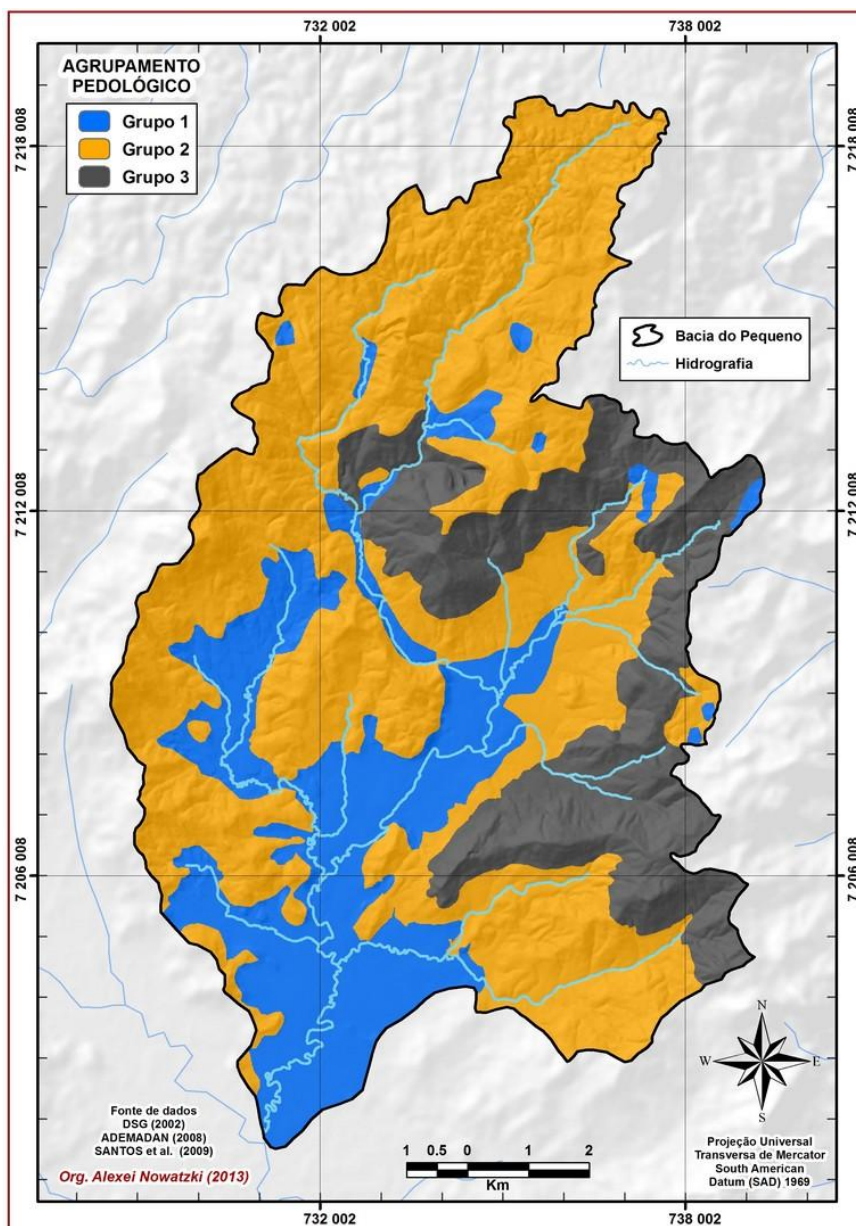


Figura 13 – Agrupamento das classes pedológicas do mapeamento de Santos et al. (2009)

3.2.6. Métodos de comparação entre o mapa gerado por Pedometria e o preexistente

Para esta dissertação, serão usados os seguintes métodos de comparação entre os mapas de Santos *et al.* (2009) e o de Pedometria: Exatidão Global, Matriz

de Erro, Erros de omissão e inclusão e Exatidão do ponto de vista do Usuário e Produtor.

Para realizar estas comparações, os Grupos 3 e 4, resultantes da Pedometria por tabulação cruzada, foram agrupados em apenas um grupo, pois o mapeamento a ser comparado dispõe de três grupos pedológicos, sendo que o Grupo 3 deste mapeamento é o grupo dos Neossolos Litólicos e a associação entre Cambissolos Háplicos com Neossolos Litólicos. Conforme foi descrito no item anterior, os Grupos 3 e 4 são os de solos rasos da bacia, por este motivo eles foram agrupados a fim que se possa fazer uma comparação coerente.

A Exatidão Global (Silveira, 2010) ou Qualidade Global (Centeno, 2003) é definida computando o número de pixels corretamente classificados, conforme Equação (4):

$$EG = nc/nt \quad (4)$$

Onde:

EG = Exatidão Global;

nc = número de pixels corretamente classificados;

nt = número de pixels total da matriz.

Por meio deste método é possível verificar o percentual de concordância (C%) e o de discordância (D%), na qual serve como um parâmetro geral de avaliação entre os mapas (SILVEIRA, 2010).

A Exatidão Global é considerada um parâmetro geral pois não permite gerar maiores conclusões, como por exemplo, determinar qual Grupo foi melhor classificada ou quais Grupos encontram-se associadas à uma superestimação e são responsáveis pela maior parcela de erros. Uma melhor avaliação é obtida por meio da matriz de confusão (CENTENO, 2003; CORREA, 2003 e SILVEIRA, 2010).

Para Moreira (2009) a Matriz de Erros ou de Confusão identifica o erro global da classificação para cada grupo, mostrando também como se deram as confusões entre os mesmos.

A Matriz de Confusão, também denominada de Matriz de Erros segundo Centeno (2003), é uma forma de representar as contradições entre a verdade de campo e o resultado do processo de classificação. Ou ainda, como no caso desta

dissertação, representar as diferenças entre um mapeamento convencional, com um mapeamento pedométrico.

Segundo esse autor, nessa matriz são confrontadas duas situações: as linhas correspondem à classe do mapa de referência (preexistente) e as colunas à classe estimada no processo de classificação do novo mapa, ou seja, os valores das linhas representam as categorias do mapa de referência, as colunas categorias do novo mapa classificado, e os elementos da diagonal principal apresentam o nível de concordância entre os dois conjuntos de dados.

A Matriz de Erros apresentada no Quadro 12, representa as contagens de pixels referentes aos Grupos do mapeamento de Santos *et al.* (2009) com as dos Grupos de pedometria geradas por tabulação cruzada, sendo que em cinza aparecem os pixels corretamente classificados entre os dois mapeamentos.

GRUPOS		PEDOMETRIA			
		1	2	3 e 4	Soma parcial
MAPEAMENTO SANTOS <i>et al.</i> (2009)	1	Acerto	Erros	Erros	Total
	2	Erros	Acerto	Erros	Total
	3	Erros	Erros	Acerto	Total
	Soma parcial	Total	Total	Total	Total bacia

Quadro 12 – Matriz de Erros parcial comparando os Grupos da Pedometria com o mapeamento de Santos *et al.* (2009).

A partir da Matriz de Erros é possível verificar os erros de omissão e os erros de inclusão. Esses erros são elementos que servem para avaliar quanto uma classe foi subestimada ou superestimada. Os erros de omissão descrevem a precisão que determinada classe de um mapa foi definida, enquanto a taxa de erros de inclusão indica quanto uma classe foi superestimada (SILVEIRA, 2010).

Os erros de inclusão correspondem aos pixels que mesmo pertencendo à outra classe, foram incluídos na classe mapeada. Por exemplo: uma classe foi mapeada como Grupo 1 no mapa predito por tabulação cruzada e que, no entanto, constitui um do Grupo 2 no mapeamento de Santos *et al.* (2009).

A Equação 5 apresenta a forma como o erro de inclusão foi calculado neste trabalho:

$$\mathbf{Ein}(i) = \mathbf{SC}(i) - \mathbf{M}(i,i) / \mathbf{SC}(i) \quad (5)$$

Onde:

$\mathbf{Ein}(i)$ = erro de inclusão;

$\mathbf{SC}(i)$ = soma parcial da coluna i da matriz de erros;

$\mathbf{M}(i,i)$ = elementos da diagonal da linha i da matriz de erros.

Conforme destaca Silveira (2010), os erros de omissão são pixels que pertencem à classe que se deseja mapear, mas que foram erroneamente classificados como sendo de outra, ou seja, foram omitidos da classe. Exemplo pode ser percebido quando uma classe de Grupo 2 no mapa de Santos *et al.* (2009) foi mapeada como Grupo 1 no mapa predito por tabulação cruzada. A Equação 6 apresenta como o erro de omissão foi obtido.

$$\mathbf{Eom}(i) = \mathbf{SL}(i) - \mathbf{M}(i,i) / \mathbf{SL}(i) \quad (6)$$

Onde:

$\mathbf{Eom}(i)$ = erro de omissão;

$\mathbf{SL}(i)$ = soma parcial da linha i da matriz de erros;

$\mathbf{M}(i,i)$ = elementos da diagonal da linha i da matriz de erros.

Os erros de omissão e inclusão levam ao conceito de Exatidão do ponto de vista do Produtor (EP) e Exatidão do ponto de vista do Usuário (EU), (CENTENO, 2003 e SILVEIRA, 2010). Para estes autores, a Exatidão do ponto de vista do Produtor está associada aos erros de omissão e pode ser medida pela taxa de pixels corretamente classificados em cada classe. Quanto maior for essa taxa maior será o sucesso alcançado nas classes do mapa classificado em relação ao mapa de referência. Foi calculado para a bacia do rio Pequeno conforme a Equação 7:

$$\mathbf{EP} = \mathbf{M}(i,i) / \mathbf{SL}(i) . 100 \quad (7)$$

Estes autores ainda destacam que a Exatidão do ponto de vista do Usuário demonstra se determinada classe na imagem classificada corresponde a essa na

imagem de referencia, estando associado à taxa de erro de inclusão. Se não existirem erros de inclusão, então a matriz de erros apresentará valores apenas na diagonal, porém geralmente isso não ocorre. EU foi calculado por meio da Equação 8:

$$EU = M(i,i) / SC(i) . 100 \quad (8)$$

3.2.7. Levantamentos de campo

O intuito desta etapa foi o de obter amostras de solos que servissem de apoio para que se analisasse a coerência das classes geradas por pedometria. Foram feitas sete coletas no total.

Outros três estudos pedológicos que abrangem a bacia do rio Pequeno, foram consultados para a escolha dos pontos de levantamento, para que não houvesse uma amostragem excessiva em determinadas porções da bacia. Esses estudos são os de Paula (2010), Silva (2010) e de Rocha *et al.* (2002).

O primeiro refere-se à tese de doutorado de Paula (2010), na qual o mapeamento pedológico serviu como subsídio para estimar a produção de sedimentos na área de drenagem da baía de Antonina. O segundo faz parte da dissertação de Silva (2010) na qual as coletas de solo auxiliaram na caracterização e mapeamento das unidades geomorfológicas da bacia do rio Pequeno.

O terceiro refere-se ao mapeamento da SPVS publicado em Rocha *et al.* (2002), na qual os mesmos efetuaram o levantamento pedológico das áreas da Reserva Natural do Rio Cachoeira. O estudo abrange o mapa do levantamento pedológico na escala 1:25.000, com legenda indicando as subordens de solos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, de acordo com Embrapa (1999). A espacialização dos quatro levantamentos se encontra na Figura 14.

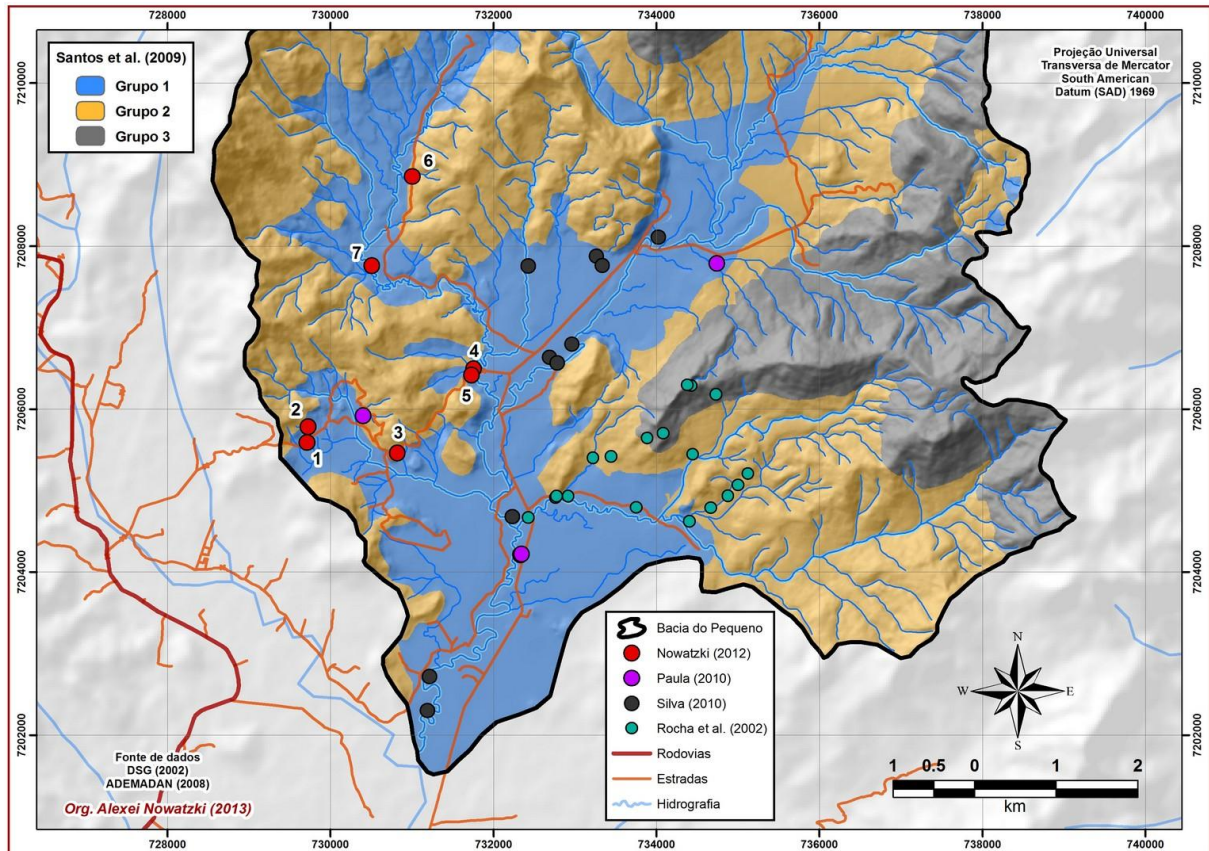


Figura 14 – Mapa de localização dos pontos de coleta de solos na bacia

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

Primeiramente, foram expostos os produtos cartográficos da bacia hidrográfica do rio Pequeno, referentes tanto aos atributos topográficos primários, quanto secundários, para que posteriormente os mapas digitais preliminares de solos fossem expostos.

Para cada atributo topográfico foi feito um cálculo de área das classes discretizadas para fins de Pedometria. A área foi portanto calculada em km² e o equivalente em porcentagem para o valor total da bacia de área (112,8km² = 100%).

Também, para cada atributo, foi exposta uma sobreposição das classes discretizadas nesta dissertação, com os agrupamentos pedológicos de Santos *et al.* (2009) presentes no Quadro 11 e na Figura 13.

4.1.1. Caracterização dos atributos topográficos primários

4.1.1.1. Hipsometria (Z)

As classes Hipsométricas da bacia do rio Pequeno (Figura 15) apresentam valores que variam entre 5 e 845m de altitude. A porção da bacia próxima da sua foz, até aproximadamente os 50m situa-se no compartimento geomorfológico Planície Litorânea. As maiores elevações se situam em torno dos 800m, nas porções situadas mais ao norte da bacia, fazendo parte do compartimento Serra do Mar paranaense.

Apesar deste atributo não ter sido escolhido para a tabulação cruzada, ele pode inferir na ocorrência de solos que se apresentam em uma variação de cotas altimétricas, como por exemplo os solos hidromórficos que a partir da verificação nos mapeamentos preexistentes na área tem concordância com porções da bacia localizadas em cotas de valores inferiores a 30m. Nota-se que os solos mais rasos da bacia se concentram em porções com elevações superiores a 600m de altitude. A Tabela 2 apresenta os cálculos de área para este atributo.

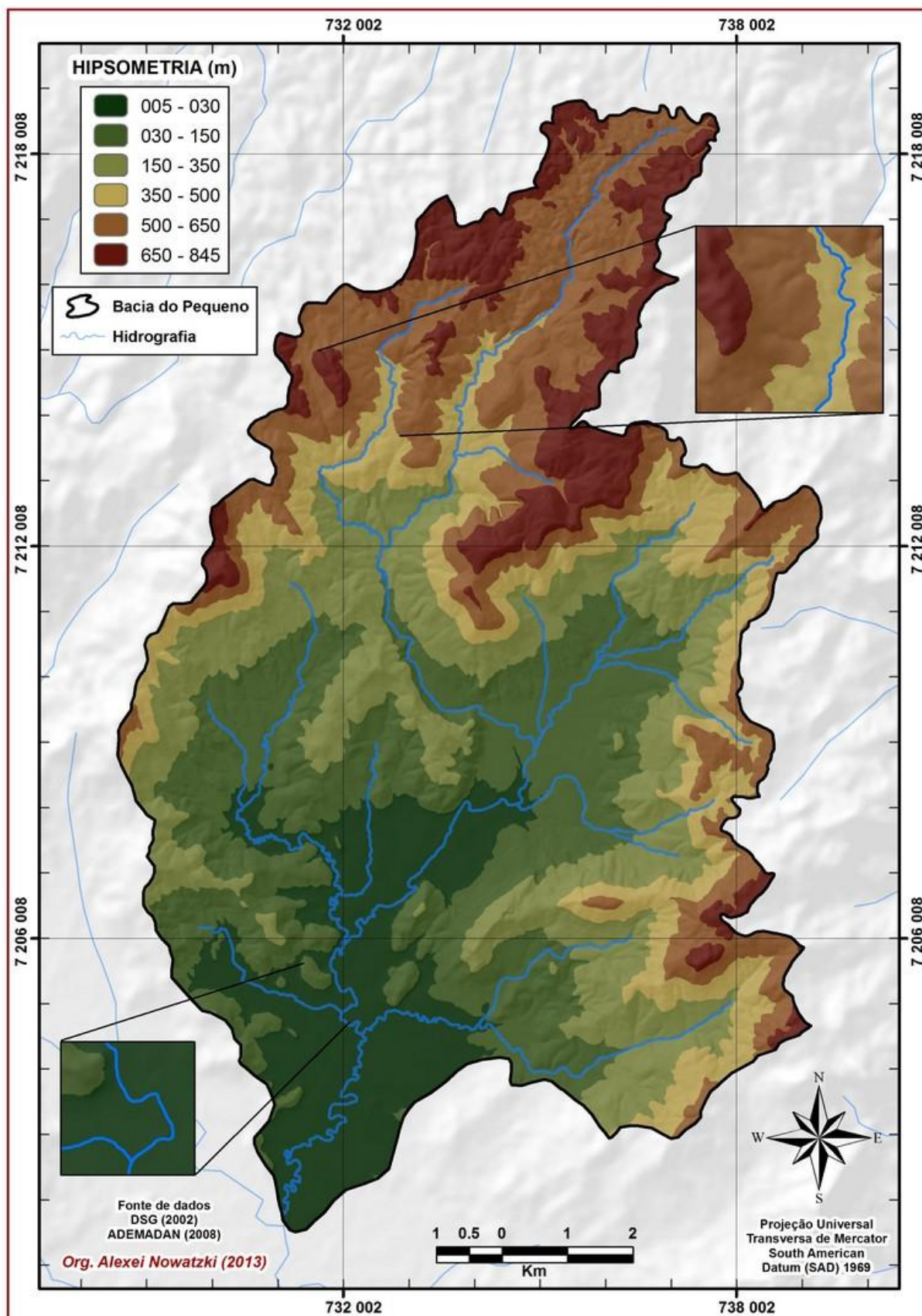


Figura 15 – Mapa de classes Hipsométricas

Tabela 2 – Cálculo de área – Hipsometria

INTERVALOS	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
< 30	15,65	13,87
30 a 150	27,35	24,25
150 a 350	23,85	21,14
350 a 500	14,75	13,07
500 a 650	20,60	18,27
650 <	10,61	9,40
TOTAL	112,8	100,0

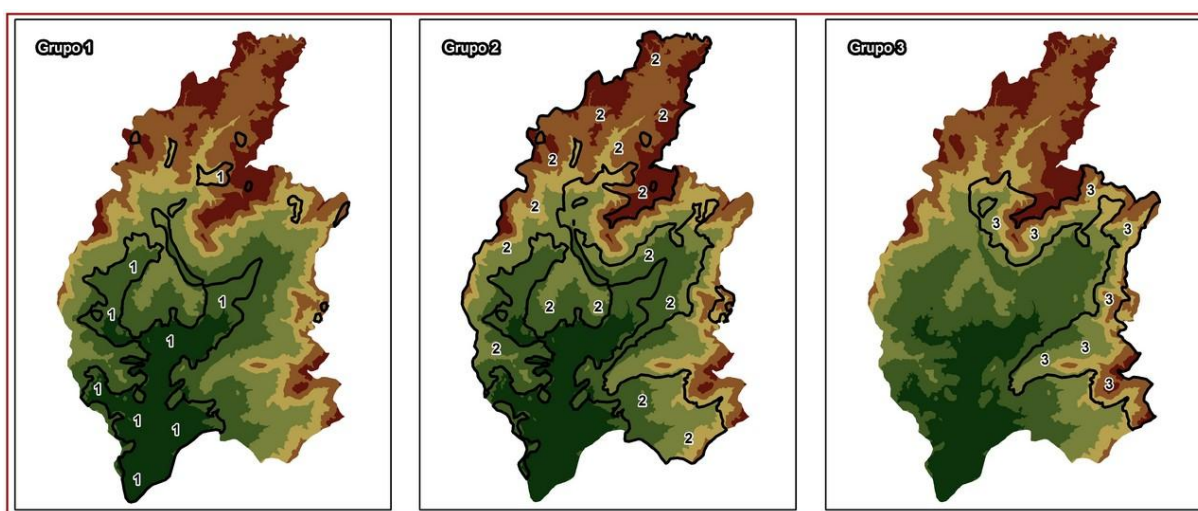


Figura 16 – Comparação entre o atributo Hipsometria com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente

4.1.1.2. Clinografia (α)

O mapa Clinográfico foi discretizado em seis classes, conforme a Figura 17. As classes Clinográficas da bacia do rio Pequeno foram divididas de acordo com a proposta da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2006).

Pode-se perceber que os maiores valores de Clinografia coincidem também com porções do compartimento geomorfológico da Serra do Mar (MAACK, 1981), que têm por características, vertentes bastante inclinadas.

Conforme Paula e Santos (2008), a ocorrência de Neossolos Litólicos ocorrem em relevos ondulados e forte ondulados da Serra do Mar. Os solos hidromórficos ocorrem nesta bacia em ambientes de planície com valores clinográficos até 8%.

Este atributo topográfico contribuiu para uma melhor espacialização das Unidades Geomórficas 3 e 4, pois no mapeamento de Santos *et al.* (2009) tem porções na região oeste da bacia em que apenas existem Cambissolos (Unidade 2), sendo que de acordo com a Clinografia, nesta região há ocorrência de áreas escarpadas (acima de 75°). Nessas áreas portanto, podem ocorrer Neossolos Litólicos (Unidade 3 e 4).

O atributo em questão foi importante também para mapear com mais precisão a Unidade Geomórfica 1, onde encontram-se os solos hidromórficos e flúvicos. Notou-se que há uma relação entre estes solos, com as classes “Plano” e “Suave Ondulado”. A Tabela 3 apresenta os cálculos de área para este atributo.

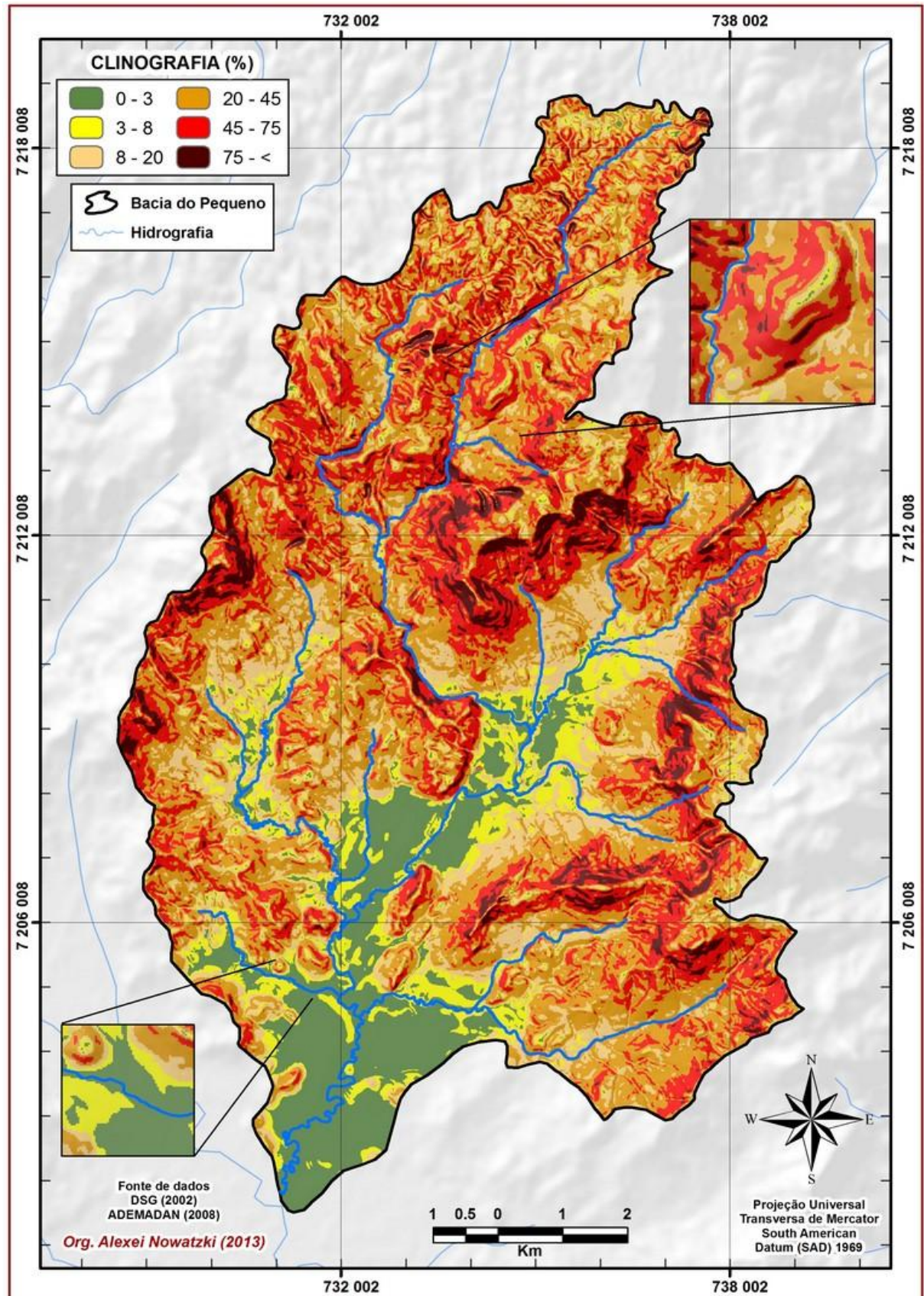


Figura 17 – Mapa de classes Clinográficas

Tabela 3 – Cálculo de área – Clinografia

CLASSE	ÁREA (KM²)	ÁREA (%)
1	12,01	10,65
2	9,45	8,37
3	17,94	15,90
4	39,92	35,39
5	27,34	24,23
6	6,10	5,41
TOTAL	112,8	100,0

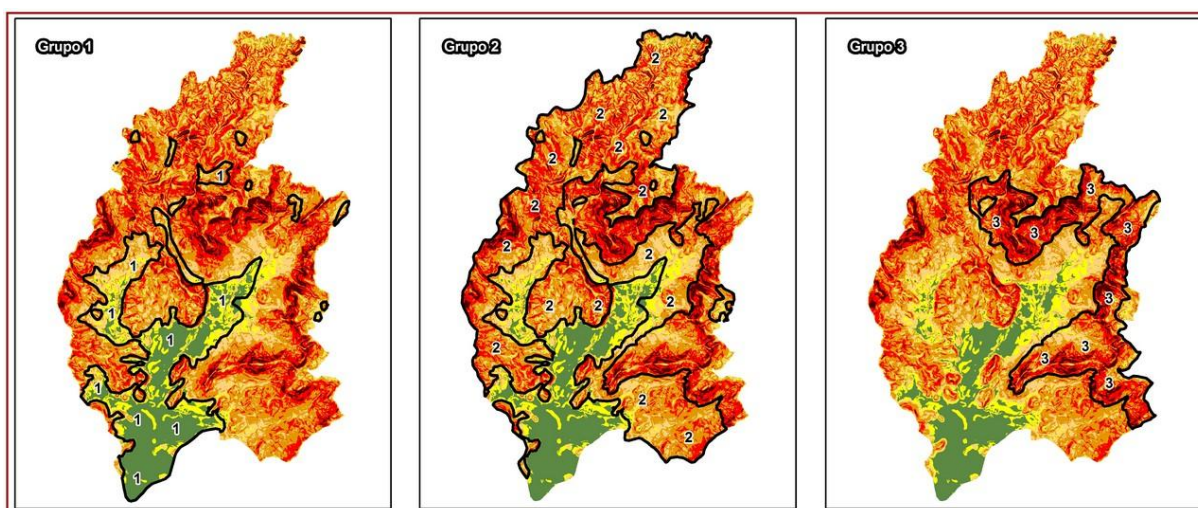


Figura 18 – Comparação entre o atributo Clinografia com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente

4.1.1.3. Perfil (φ) e Plano (ψ) de curvatura

O perfil de curvatura se refere à forma da vertente, podendo ser classificado como convexo, côncavo ou retilíneo, ao ser analisada em perfil. A Tabela 4 apresenta os cálculos de área para este atributo e a Figura 19 espacializa sua distribuição.

O plano de curvatura, ou curvatura horizontal, refere-se ao caráter divergente ou convergente dos fluxos de matéria e energia nas vertentes, em projeção horizontal. A Tabela 5 apresenta os cálculos de área para este atributo bem como a Figura 20 espacializa sua distribuição.

Esses dois atributos topográficos primários não foram incluídos na matriz da Tabulação Cruzada para chegar nas Unidades Geomórficas pois tanto as manchas de valores convexos e côncavos quanto divergentes e convergentes não apresentaram nenhuma relação que pudesse indicar a distribuição dos solos presentes em Santos *et al.* (2009). Entretanto, percebe-se uma tendência de superfícies planares e retilíneas em áreas da Unidade 1, conforme as Figura 21 e Figura 22.

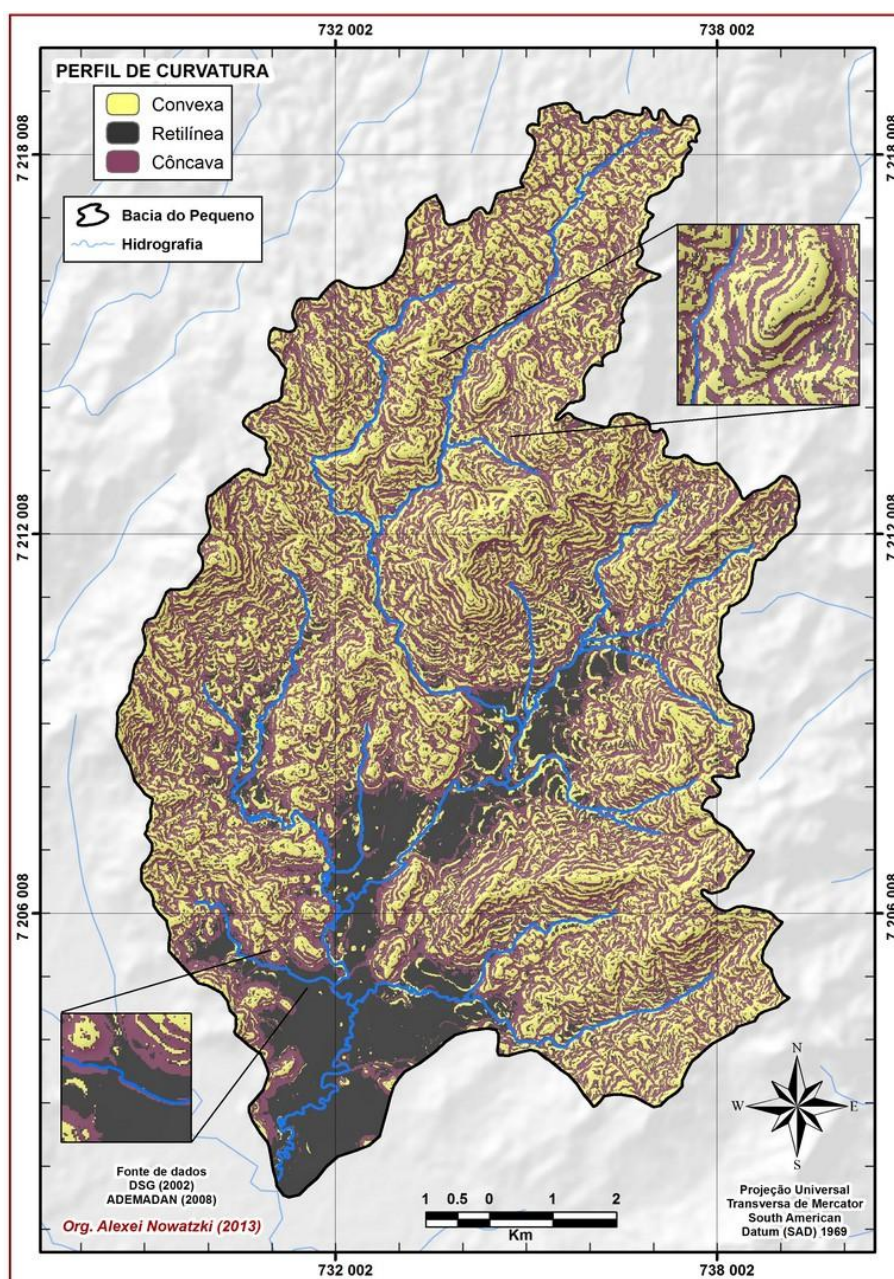


Figura 19 – Mapa de classes do Perfil de curvatura

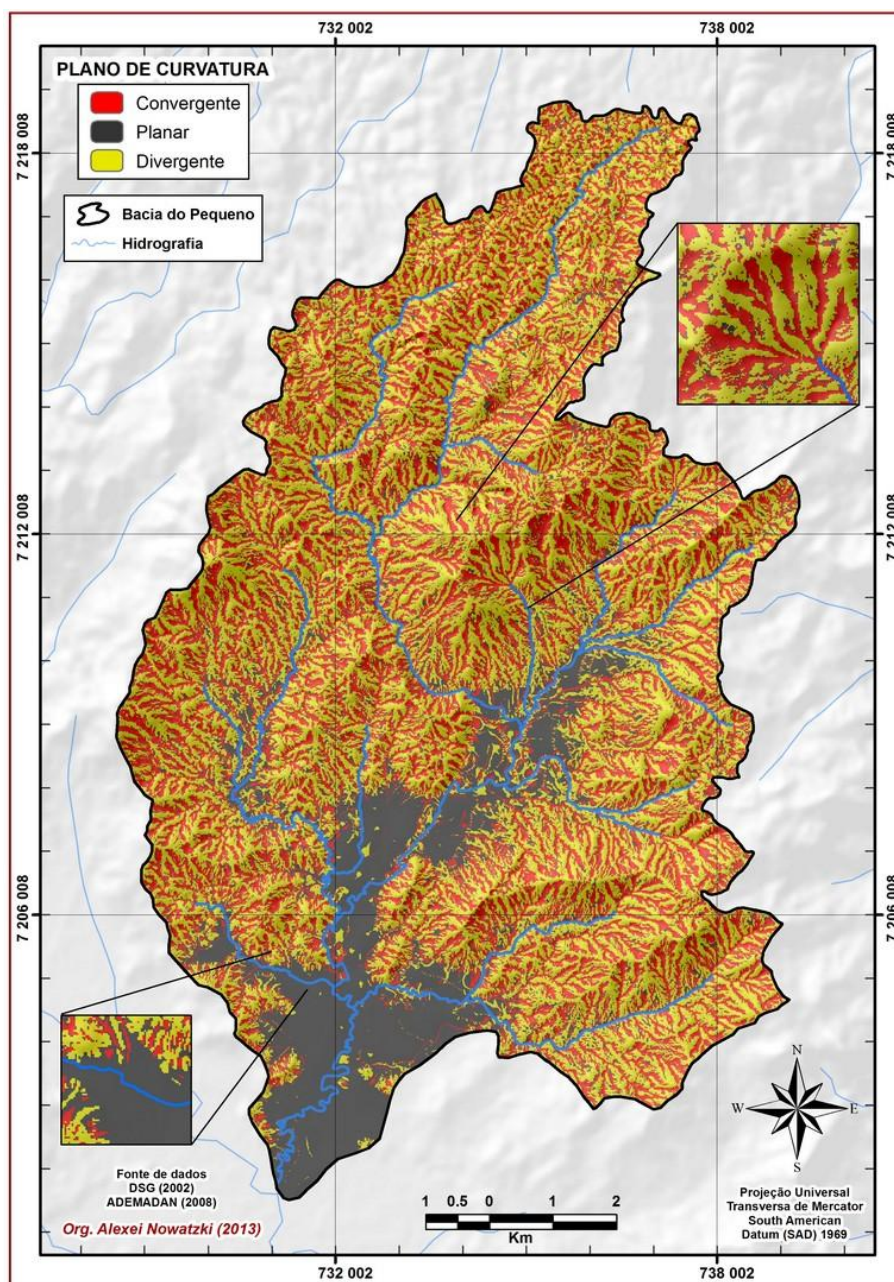


Figura 20 – Mapa de classes do Plano de curvatura

Tabela 4 – Cálculo de área – Perfil de curvatura

CLASSE	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Convexa	44,90	39,81
Retilínea	20,88	18,51
Côncava	46,97	41,64
TOTAL	112,8	100,0

Tabela 5 – Cálculo de área – Plano de Curvatura

CLASSE	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Convergente	37,94	33,64
Planar	21,92	19,44
Divergente	52,89	46,89
TOTAL	112,8	100,0

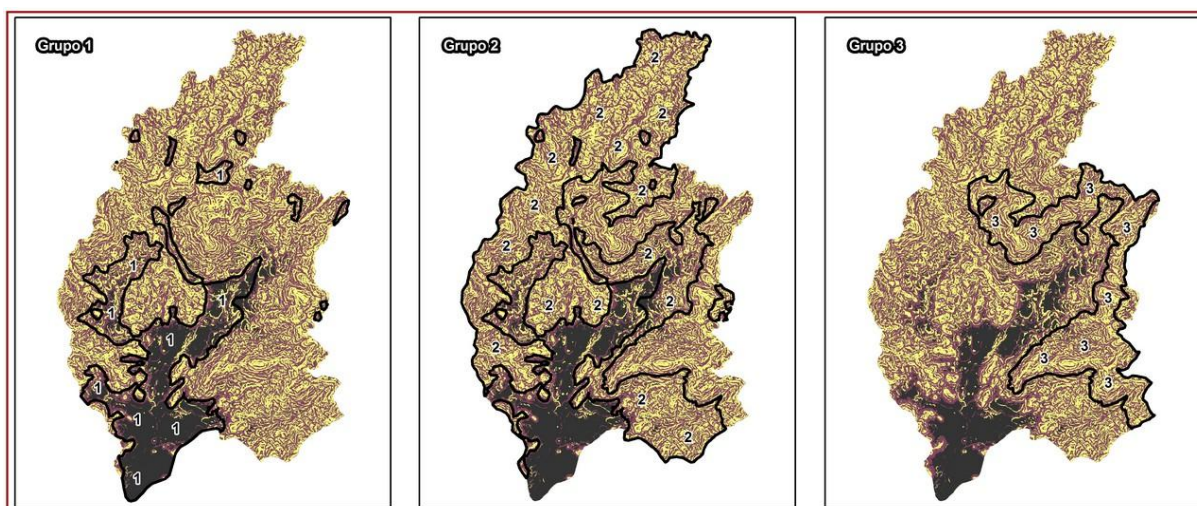


Figura 21 – Comparação entre o atributo Perfil de Curvatura com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente

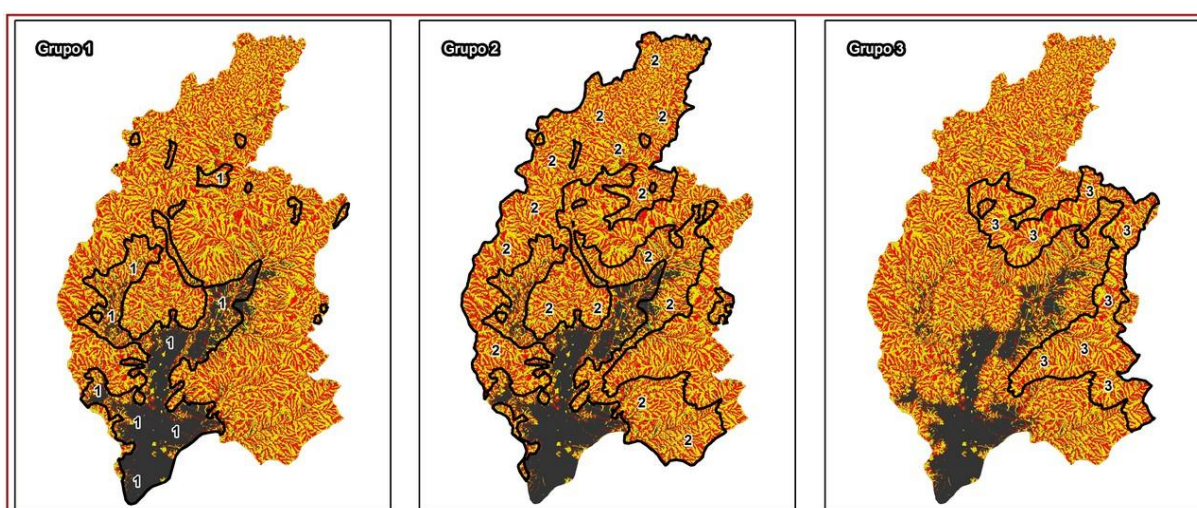


Figura 22 – Comparação entre o atributo Plano de Curvatura com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente

4.1.2. Caracterização dos atributos topográficos secundários

4.1.2.1. Índice de Corrente de Máximo Fluxo (Ω)

O Índice de Corrente de Máximo Fluxo, apresentou valores entre 0 e 8.587.737. Quando mais alto este valor, maior será a intensidade do fluxo hídrico, em vertentes com plano convergente. Portanto, de acordo com a Figura 23, as classes 1 e 2 são consideradas de baixos valores, onde existe uma estagnação

hídrica e onde ocorrem os processos deposicionais. Já as classes 3 e 4 são valores altos deste Índice. A Tabela 6 apresenta os cálculos de área para este atributo.

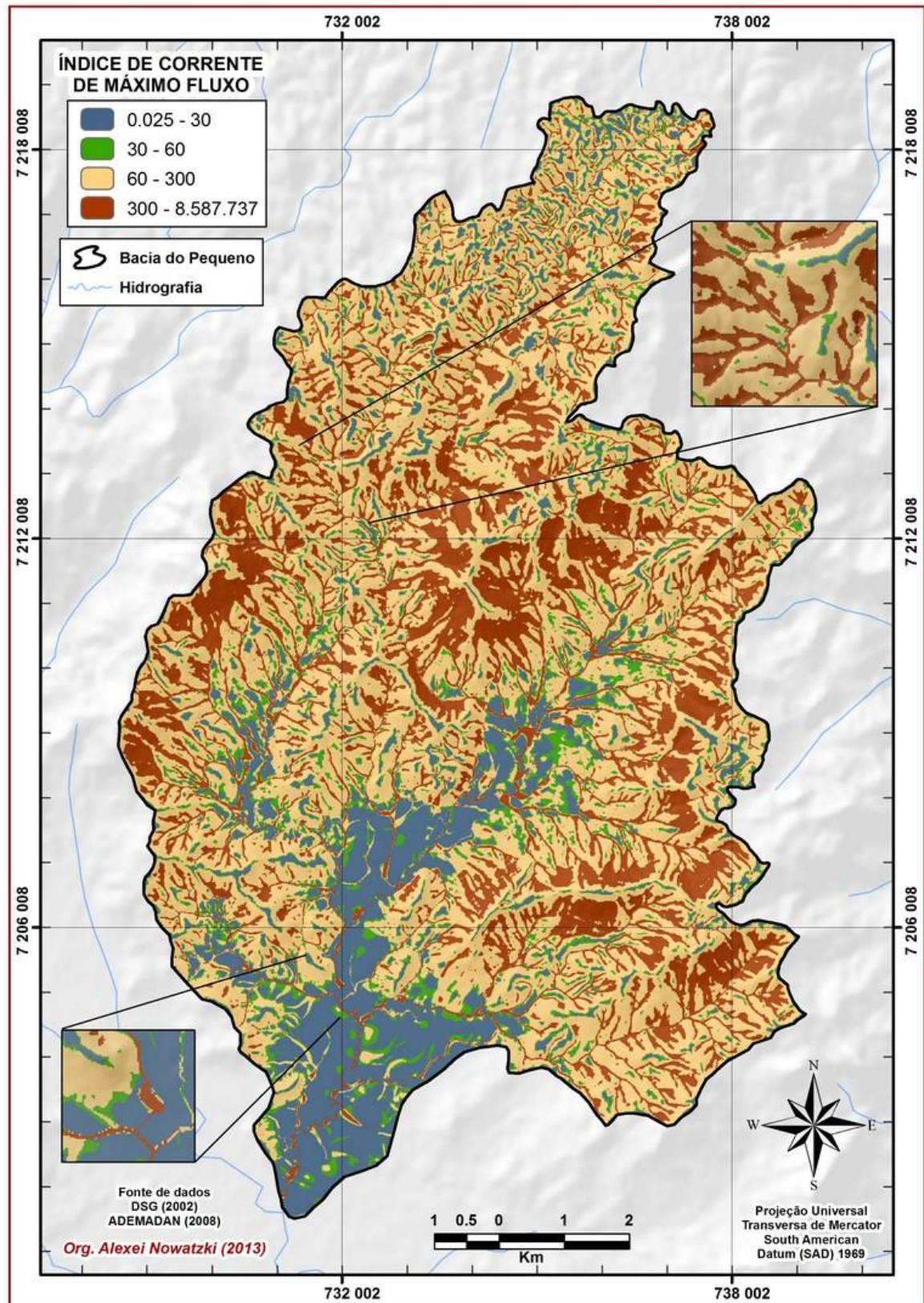


Figura 23 – Mapa do Índice de Corrente de Máximo Fluxo

Tabela 6 – Cálculo de área – Índice de Corrente de Máximo Fluxo

INTERVALOS	CLASSE	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
< 30	1	16,09	14,26
30 a 60	2	10,32	9,15
60 a 300	3	56,11	49,74
300 <	4	30,26	26,83
TOTAL	-----	112,8	100,0

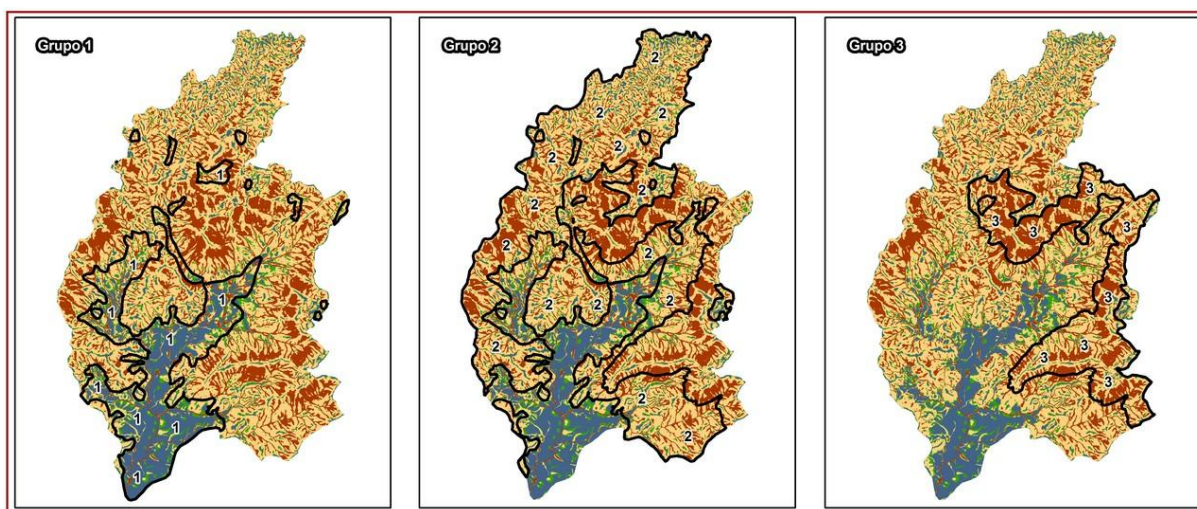


Figura 24 – Comparação entre o atributo O Índice de Corrente de Máximo Fluxo com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente

4.1.2.2. Índice Topográfico de Umidade (w)

Este Índice auxilia na delimitação de solos hidromórficos, como Gleissolos, Neossolos Flúvicos ou ainda Organossolos, da mesma forma que a Clinografia e a Hipsometria também podem contribuir, apontando relevo planos, ou cotas altimétricas baixas, respectivamente.

No rio Pequeno, o índice em questão, variou de 3 a 25.43, sendo que os valores mais altos representam uma maior umidade no solo. Esses valores são encontrados em porções baixas do relevo e as maiores concentrações estão localizadas nas áreas de planícies aluviais, ao sul e centro-sul da bacia. Este índice também aponta os divisores de água, com valores baixos. A Tabela 7 apresenta os cálculos de área para este atributo e a Figura 25 a sua espacialização.

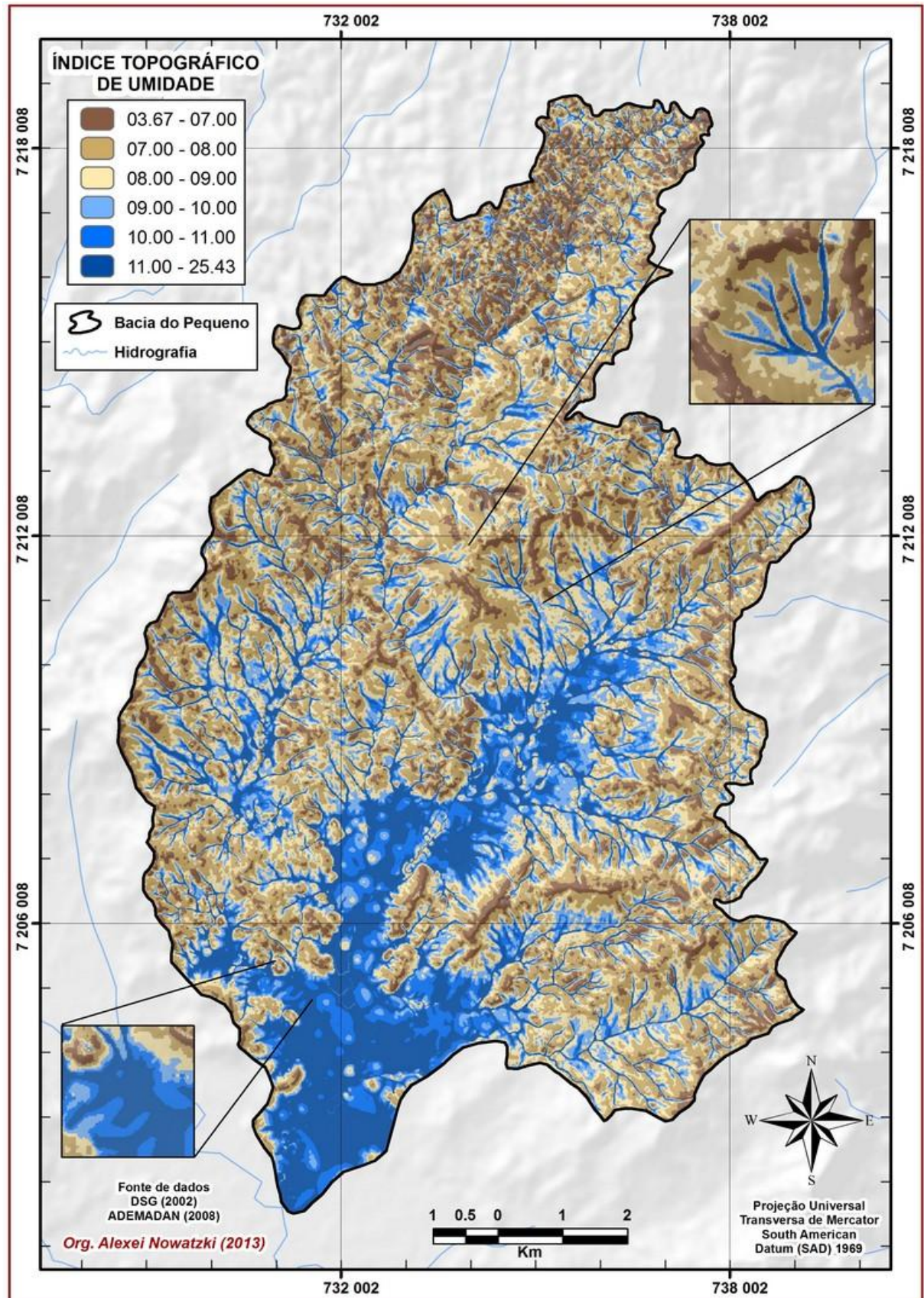


Figura 25 – Mapa do Índice Topográfico de Unidade

Tabela 7 – Cálculo de área – Índice Topográfico de Umidade

INTERVALOS	CLASSE	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
< 7	1	13,66	12,11
7 a 8	2	35,68	31,63
8 a 9	3	24,39	21,62
9 a 10	4	13,41	11,88
10 a 11	5	9,14	8,10
11 <	6	16,51	14,63
TOTAL	-----	112,8	100,0

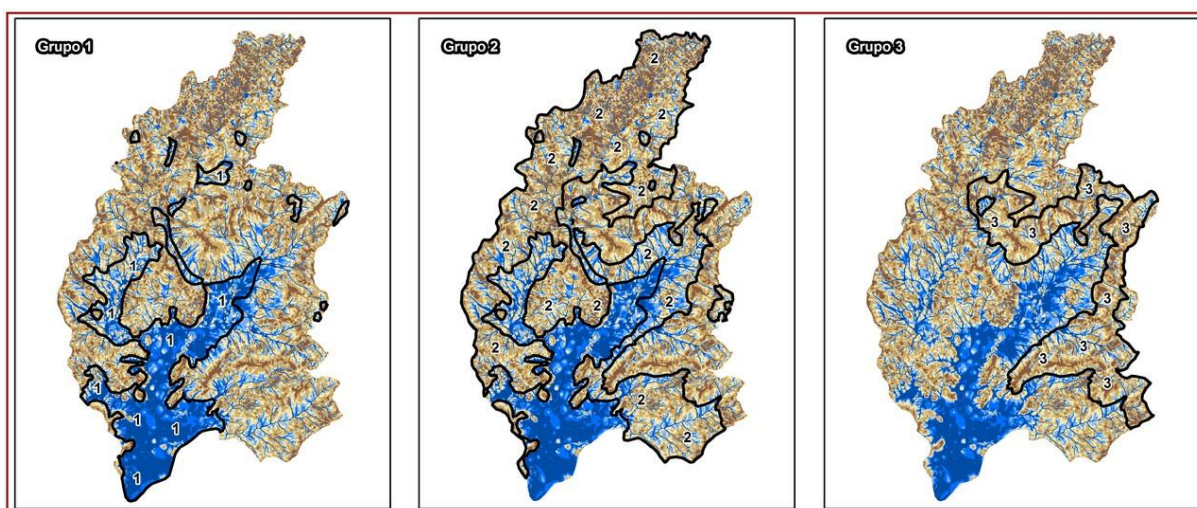


Figura 26 – Comparação entre o atributo Índice Topográfico de Umidade com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente

4.1.2.3. Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (τ)

Os valores do índice variaram de 0 a 2.800, cujos maiores valores representam as áreas com um maior potencial erosivo. Estas áreas, representadas em vermelho nos mapas, podem ser encontradas na porção central da bacia. Os divisores oeste e leste da bacia do rio Pequeno possuem porções com alto índice de capacidade de transporte de sedimentos, o que contribuiu nas tabulações cruzadas para a distinção de Unidades Geomórficas. A Tabela 8 apresenta os cálculos de área para este atributo e a Figura 27 a sua espacialização.

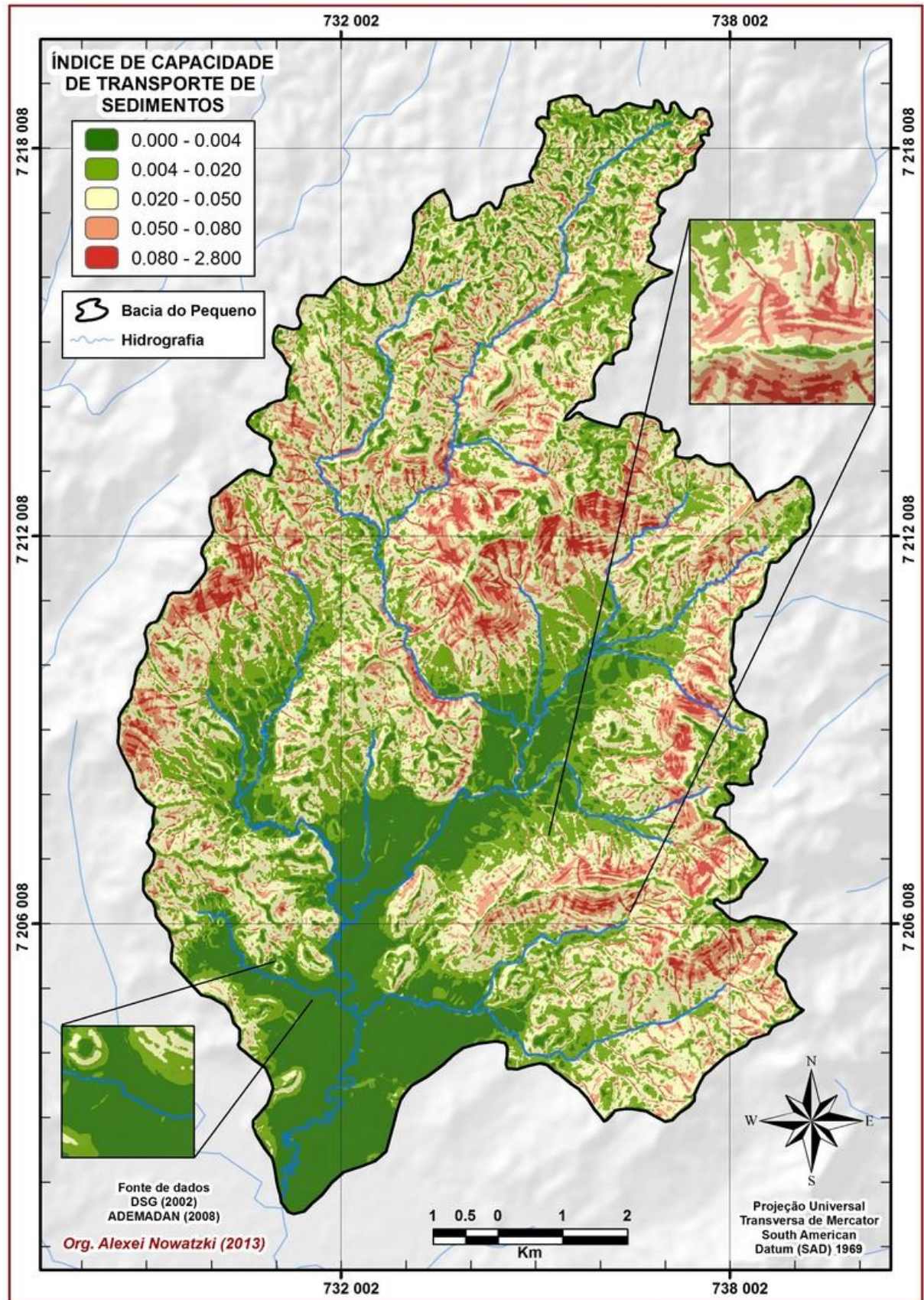


Figura 27 – Mapa do Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos

Tabela 8 – Cálculo de área – Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos

INTERVALOS	CLASSE	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
< 0,004	1	20,63	18,29
0,004 a 0,02	2	30,84	27,34
0,02 a 0,05	3	41,29	36,60
0,05 a 0,08	4	14,02	12,43
0,08 <	5	6,03	5,34
TOTAL	-----	112,8	100,0

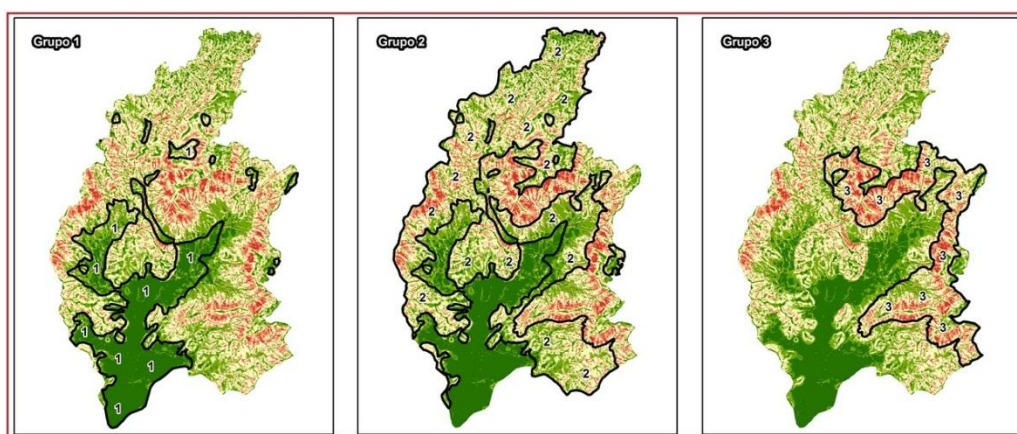


Figura 28 – Comparação entre o atributo Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos com o agrupamento de solos do mapeamento preexistente

4.2. MAPEAMENTO DE SOLOS POR TABULAÇÃO CRUZADA

4.2.1. Tabulação cruzada entre os atributos topográficos escolhidos

De acordo com o apresentado no capítulo 4 (Materiais e Métodos), a partir da escolha dos atributos topográficos primários e secundários: Topográfico de Umidade, Corrente de Máximo Fluxo, Clinografia e Capacidade de Transporte de Sedimentos foram feitos os seguintes cruzamentos, via tabulação cruzada de matrizes:

Topográfico de Umidade (w) x Corrente de Máximo Fluxo (Ω) e
 Clinografia (α) x Capacidade de Transporte de Sedimentos (τ)

Estes cruzamentos, presentes nos Quadros 4 e 6, foram espacializados com auxílio do *software* ArcGis 9.3.1., na qual resultou a Figura 29.

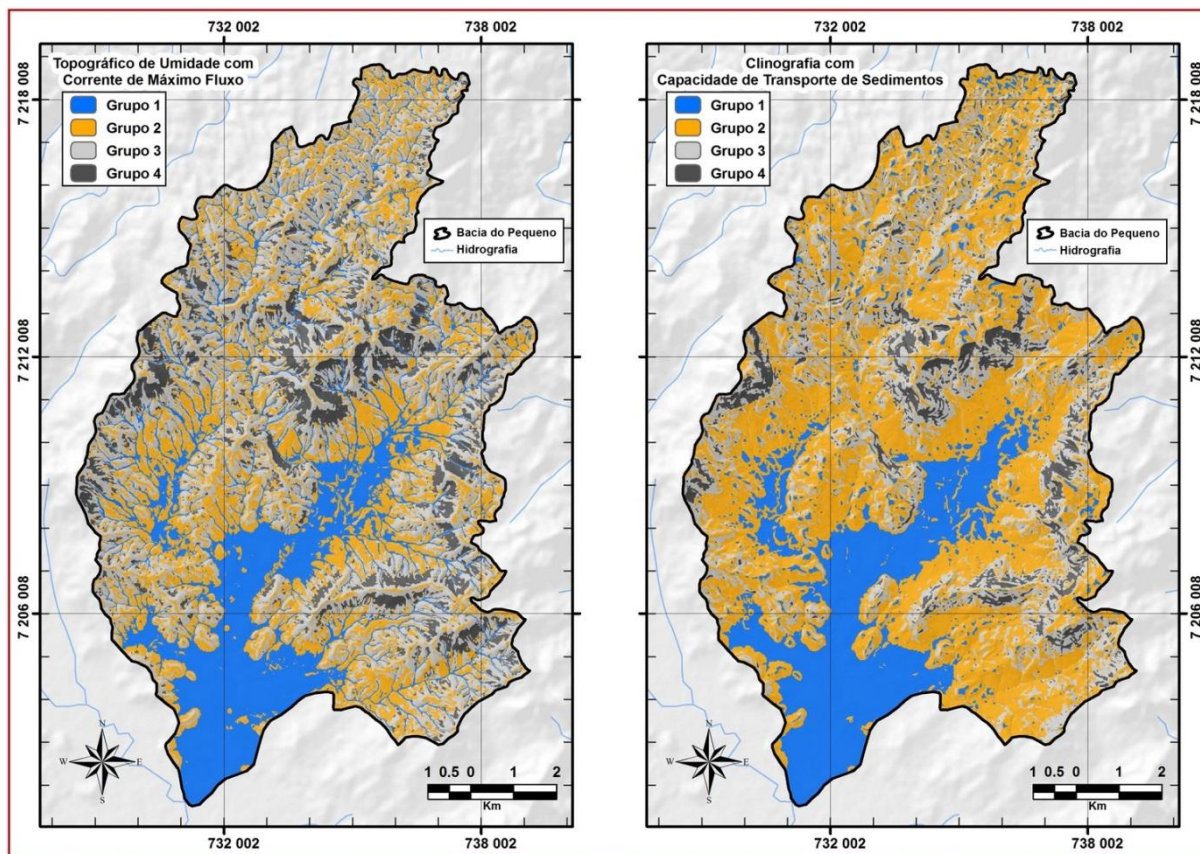


Figura 29 – Índices Topográfico de Umidade com Corrente de Máximo Fluxo e Clinografia com Capacidade de transporte de Sedimentos

4.2.2. Mapeamento final de solos a partir de Unidades Geomórficas

A partir do resultado dos cruzamentos descritos no item anterior, foi feita a tabulação cruzada entre as informações presentes nos Quadros 4 e 6, chegando portanto no mapa final de Unidades Geomórficas da bacia hidrográfica do rio Pequeno (Figura 30), dividida em quatro grupos (1, 2, 3 e 4).

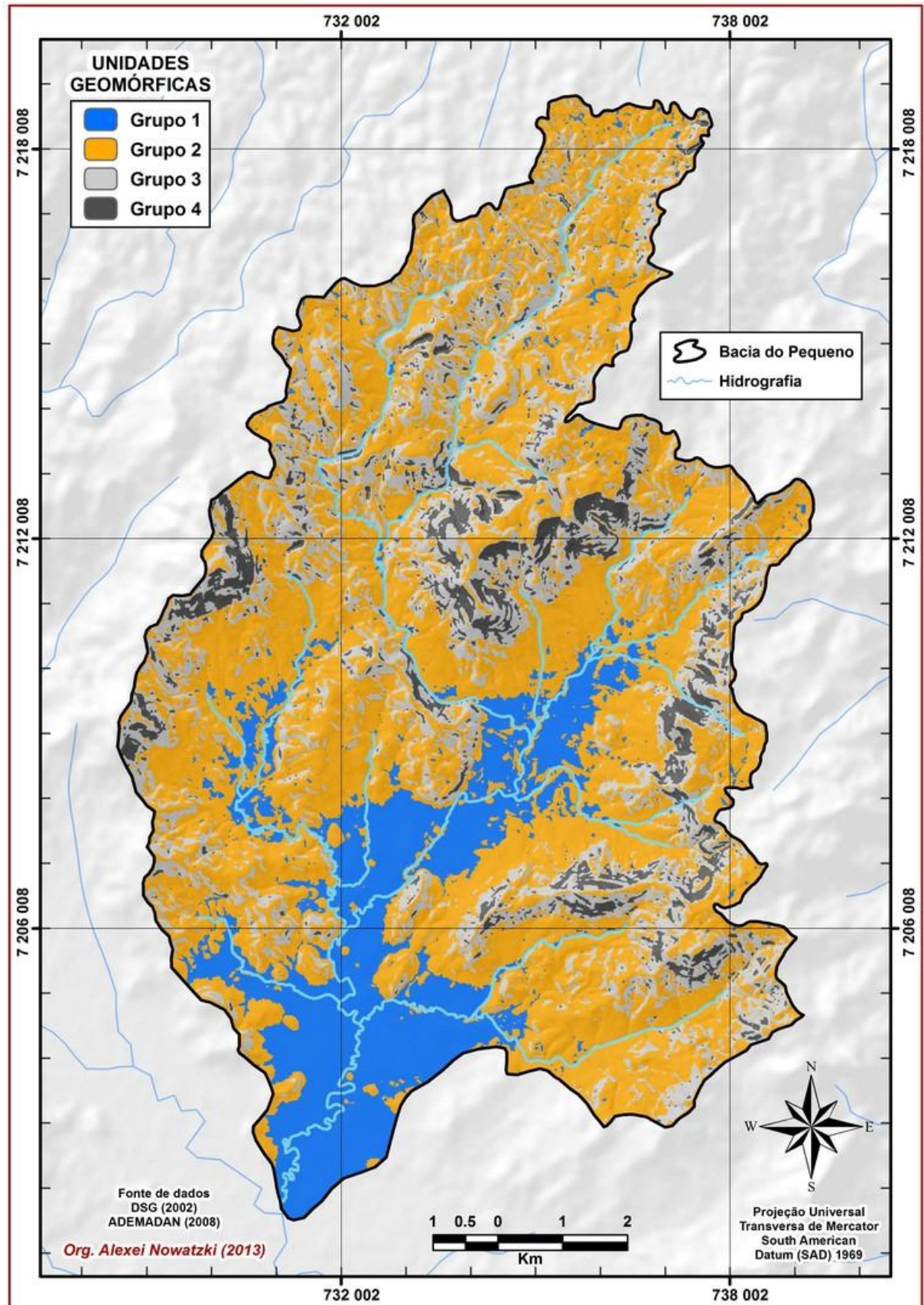


Figura 30 – Grupos de Unidades Geomórficas geradas por tabulação cruzada

A Tabela 9 demonstra a proporção de área ocupada por cada um dos Grupos mapeados. Nota-se que o grupo que ocupa o maior valor de área é o Grupo 2, sendo que o menor é o Grupo 4.

Tabela 9 – Cálculo das áreas dos Grupos referentes às Unidades Geomórficas

GRUPO	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
1	18,1	16,0
2	60,8	53,9
3	27,2	24,2
4	6,7	5,9
TOTAL	112,8	100,0

Em seguida, é feita uma descrição dos tipos de solos encontrados em cada uma das Unidades Geomórficas, de acordo com os Grupos que foram definidos previamente. Essa descrição é feita conforme a sobreposição de cada Grupo com as informações dos quatro atributos topográficos selecionados, bem como quais são os processos predominantes (potencial entre morfogênese e pedogênese).

- **Grupo 1:**

Solos com características **Hidromórficas** e **Flúvicas**. De acordo com mapeamentos preexistentes supramencionados, estas porções possuem uma complexidade de solos característicos de áreas úmidas (PARANÁ e BRASIL, 2008), portanto para um mapa pedológico, fica imprescindível uma generalização. Este grupo resultou de uma combinação de características naturais onde, por meio dos atributos topográficos, os valores são extremos, como no caso do Índice Topográfico de Umidade, que consegue apontar áreas onde existe uma grande concentração de umidade no solo. Pelo Índice de Corrente de Máximo Fluxo também é possível ver uma grande contribuição, pois as áreas de Planície Aluvial provenientes de Sedimentos Cenozóicos, são áreas onde existe uma estagnação hídrica e os valores deste índice são extremamente baixos. Pela Clinografia também é possível perceber uma grande coincidência entre as áreas com vertentes abaixo de 8%. Por fim, os valores derivados do Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos são baixos, pois estas áreas representam porções do relevo, onde os processos deposicionais e pedogenéticos, predominam sobre os processos erosivos e

morfogenéticos. De acordo com os cálculos de área, este grupo possui 18,1 km² o que equivale 16% da bacia.

- **Grupo 2:**

Os solos encontrados neste grupo ocupam a maior área do mapeamento, com 60,8 km² (53,9% do total). Esta Unidade Geomórfica foi considerada por representar os **Cambissolos** (mais precisamente os Cambissolos Háplicos) da bacia, pois são os solos que aparecem na vertente (do terço inferior pro terço médio) logo após os solos hidromórficos. As condições que estes solos aparecem na paisagem da bacia do Pequeno são quando a partir do momento em que existe o contato da Planície Aluvial com o compartimento geomorfológico de Áreas Colúviais Montanhosas e em alguns casos de áreas Serranas estes solos começam a aparecer, representando solos diferenciados dos hidromórficos/flúvicos por apresentarem uma maior oxidação, notadas com tonalidades mais amareladas e com matiz 5YR. Com relação à Clinografia, estes solos se encontram em classes que variam de 8 a 45%, sendo que nas amostras coletadas em campo, nos declives mais leves os solos possuíam maior profundidade no horizonte B. Contudo, percebeu-se uma grande quantidade de minerais primários (alteráveis), o que não permite os enquadrar como Latossolos. Para Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos, estes solos aparecem em valores intermediários e em alguns casos valores baixos, por estarem situados em porções coluvionares, onde existe certo equilíbrio no balanço pedogênese/morfogênese. Com relação ao Índice Topográfico de Umidade, os Cambissolos são percebidos apenas em valores intermediários da mesma forma que o Índice de Corrente de Máximo Fluxo. Este fato pode ser entendido pela posição destes solos na vertente no contexto da paisagem da bacia do rio Pequeno.

- **Grupo 3:**

São solos com profundidades menores do que os outros dois grupos anteriores, visto que estes são encontrados em terços superiores das vertentes. Por se tratar de uma bacia localizada em maior parte na Serra do Mar, existe uma tendência dos solos serem mais rasos. Este grupo representa uma associação entre **Neossolos Litólicos** com **Cambissolos**, pois esta Unidade pode ser considerada uma transição entre o Grupo 2 com o Grupo 4. São localizados em porções mais montanhosas da

bacia com valores clinográficos altos (de 45 a 75%). O Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos nestas porções possui valores de intermediários a altos, pois este grupo fica caracterizado por porções onde existe uma predominância de processos erosivos. Já para os Índices Topográfico de Umidade e de Corrente de Máximo Fluxo, os valores se deram de intermediários a baixos, pois como são áreas de alta clinografia e por se localizarem em porções de terço superior de vertente, existe pouca umidade no solo, bem como uma baixa estagnação hídrica. Segundo os cálculos de área, este grupo possui 27,2 km² o que equivale 24,1% da bacia do rio Pequeno.

- **Grupo 4:**

Estes solos são os mais rasos da bacia e os menos desenvolvidos, por isso sugere-se que se enquadrem como **Neossolos Litólicos**. Em alguns casos pode existir afloramento rochoso, conforme foi percebido visualmente no trabalho de campo, pois os valores dos atributos topográficos são extremos. Este fato fica evidenciado pois esse Grupo se encontra em porções escarpadas de clinografia (acima de 75%), o que remete a ideia de que existem praticamente apenas processos erosivos atuantes, desta forma acredita-se que exista apenas um horizonte A, extremamente raso sobre uma rocha subjacente. O mesmo ocorre para o Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos, que são valores bastante altos, por onde pode-se concluir que existe praticamente apenas morfogênese atuante. Para os Índices restantes, os valores são os mais extremos com pouca umidade no solos e baixa estagnação hídrica. Este Grupo ocupa 6,7 km² na bacia, o que equivale a 5,9%.

De acordo com essas descrições dos Grupos é possível aplicar a seguinte legenda para um mapa Pedométrico conforme o Quadro 13.

UNIDADE GEOMÓRFICA (GRUPO)	TIPOS DE SOLOS
1	Hidromórficos e Flúvicos
2	Cambissolos
3	Cambissolos + Neossolos Litólicos
4	Neossolos Litólicos

Quadro 13 – Classificação pedológica de acordo com as Unidades Geomórficas

A Figura 31 exemplifica a distribuição dos Grupos de acordo com os quatro atributos topográficos escolhidos, representados na porção inferior da figura.

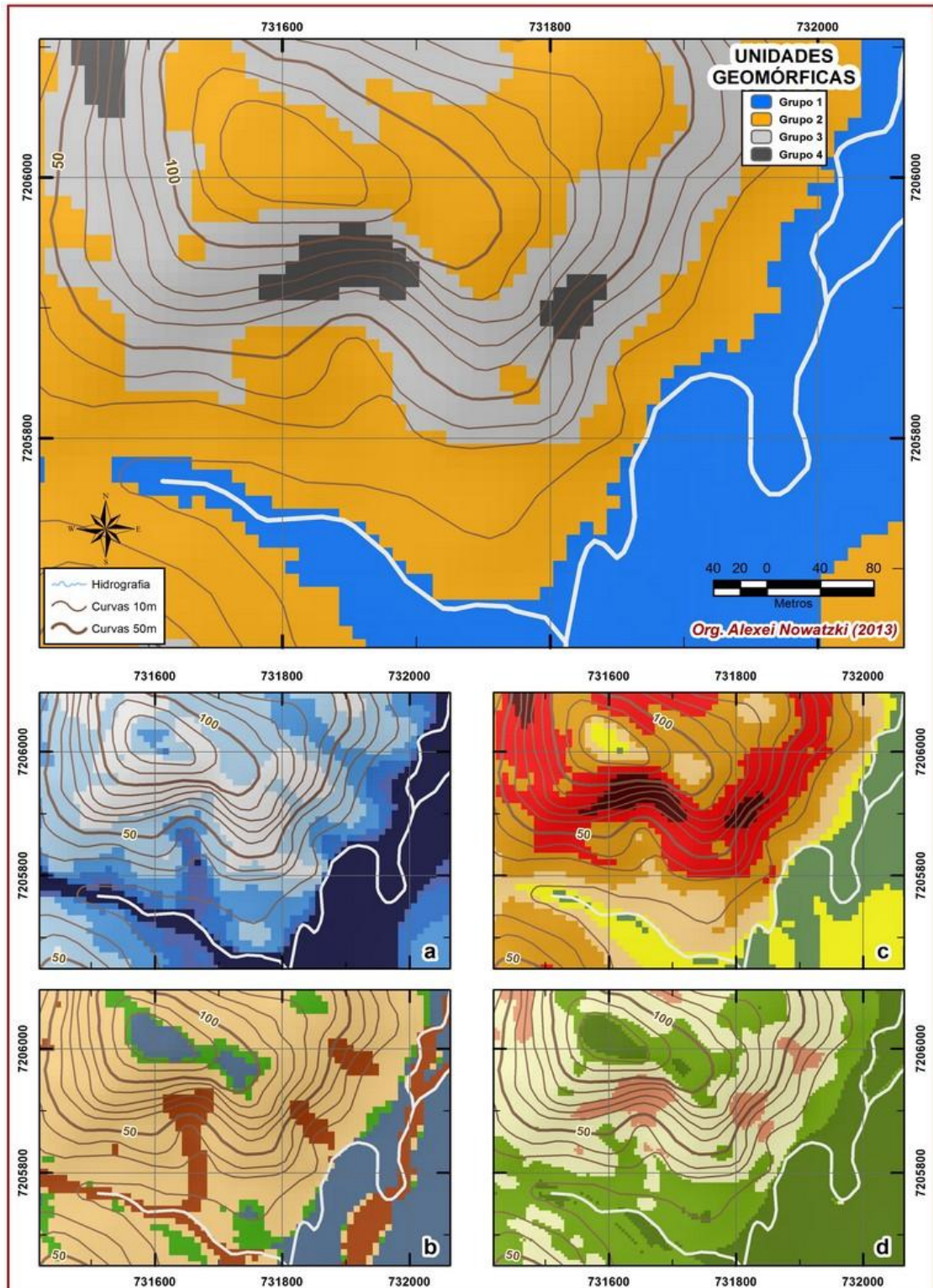


Figura 31 – Representação de uma porção da bacia através dos Grupos resultantes e os atributos topográficos escolhidos: (a) Topográfico de Umidade; (b) Corrente de Máximo Fluxo; (c) Clinografia; (d) Capacidade de Transporte de Sedimentos

4.2.3. Acompanhamento de campo

O trabalho de campo possibilitou um melhor entendimento da paisagem da bacia do rio Pequeno, pois foi possível notar onde existem as transições entre os Grupos mapeados. Percebe-se que existe uma boa coerência com relação às informações pedológicas dos pontos de coleta, com os Grupos mapeados pela Pedometria. Para o mapeamento de Santos *et al.* (2009), os pontos se situam, com exceção do ponto 6, em áreas do Grupo 1. Contudo, estes pontos estão sempre próximos das bordas dos mesmos, o que pode ser explicado por uma questão de escala de mapeamento. O Quadro 14 demonstra essas diferenças sendo que as coordenadas X e Y foram coletadas pelo DATUM SAD-69 (Fuso 22S).

PONTO Nº	COORD. X	COORD. Y	COR (MUNSELL)	NOME (IBGE, 2007)	GRUPO PEDOMETRIA	GRUPO SANTOS ET AL. (2009)
1	729715	7205590	10YR 7/4	Bruno muito claro-acinzentado	2	1
2	729726	7205785	5YR 5/8	Vermelho-amarelado	2	1
3	730821	7205462	5YR 6/8	Amarelo-avermelhado	2	1
4	731757	7206495	GLE Y2 4/10 BG	Cinzeno-esverdeado-escuro	1	1
5	731731	7206418	5YR 7/8	Amarelo-avermelhado	2	1
6	731003	7208855	5YR 5/8	Vermelho-amarelado	1	2
7	730507	7207762	GLE Y1 5/10 GY	Cinzeno esverdeado	1	1

Quadro 14 – Informações gerais dos pontos coletados no trabalho de campo

O ponto de coleta 1 foi realizado em uma área plana, de pastagem, próximo do rio Pinheiro, um dos afluentes do rio Pequeno. Apresentou cor Bruno muito claro-acinzentado e se enquadrou coerentemente no Grupo 2 do mapeamento por Pedometria. O ponto 2 é de uma porção com declives suaves, próximos do ponto 1, com cobertura da terra de “agricultura abandonada”. Este ponto possui uma coloração vermelho-amarelado, o que valida o seu enquadramento no Grupo 2. O ponto 3, de cor amarelo-avermelhado, se enquadrou perfeitamente no Grupo 2, pois foi coletado em uma porção com uma clinografia de aproximadamente 20% (valor estipulado visualmente em campo). Foi notificado que a área da coleta é de

agricultura, que sofreu com recentes queimadas. O ponto **4**, foi coletado em uma área plana, (Figura 14 e Fotografia 4) com vegetação típica de áreas úmidas. Este ponto apresentou características hidromórficas, com a cor cinzento-esverdeado-escuro. Entretanto, em algumas porções o trado holandês sofreu resistência por encontrar a rocha subjacente muito próxima da superfície. Foi feita uma tradagem a menos de 10 metros do ponto 4 e a cor resultante foi de 7.5YR 7/2. A Fotografia 4 mostra a coleta deste ponto, que nos dois mapeamentos se enquadrou no Grupo 1.



Fotografia 4 – Coleta do ponto 4

Próximo do ponto anterior, na encosta, foi feita a coleta do ponto **5**, se enquadrando no Grupo 2 da Pedometria, apresentando coloração amarelo-avermelhado. É uma porção com declives suaves a moderados e foi notada uma ausência de um Horizonte A. A Fotografia 5 exemplifica esse ponto.



Fotografia 5 – Coleta do ponto 5

Estes dois pontos resultaram em uma grande coerência com o mapeamento da Pedometria, pois como foram dois pontos próximos, um na Planície Aluvial e

outro numa porção de encosta, foi possível verificar a transição entre os Grupos mapeados. Este fato pode ser notado na Figura 32, feita em uma escala de aproximadamente 1:3.000.

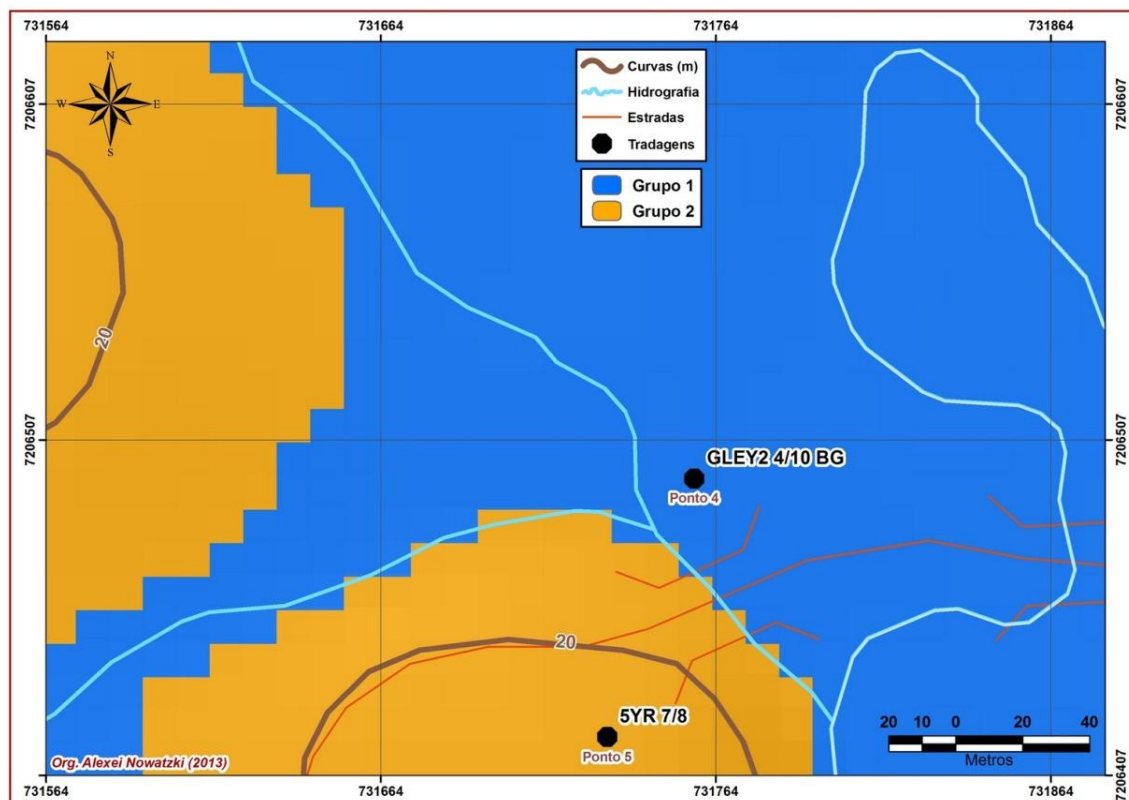


Figura 32 – Representação de uma coleta em encosta e outra na Planície Aluvial (Pontos 4 e 5)

A Fotografia 6 representa a compartimentação da paisagem de acordo com os três Grupos gerados por Pedometria, presentes na Figura 30 (Grupos 1, 2 e 3). O ponto de coleta 5 (Figura 14), efetivado em uma área pertencente ao Grupo 1, evidenciou um caráter hidromórfico, da mesma forma que no ponto 4 foi identificado um solo mais amarelado, indicando oxidação.



Fotografia 6 – Compartimentação pedológica feita em campo

Com o uso do *software Google Earth* foi possível identificar os locais das coletas 4 e 5 e as feições geomorfológicas presentes na fotografia 6 (Figura 33). Deste modo foi possível identificar as classes I e II a partir de fotointerpretação. A seta em amarelo representa o local onde foi tirada a Fotografia 6.

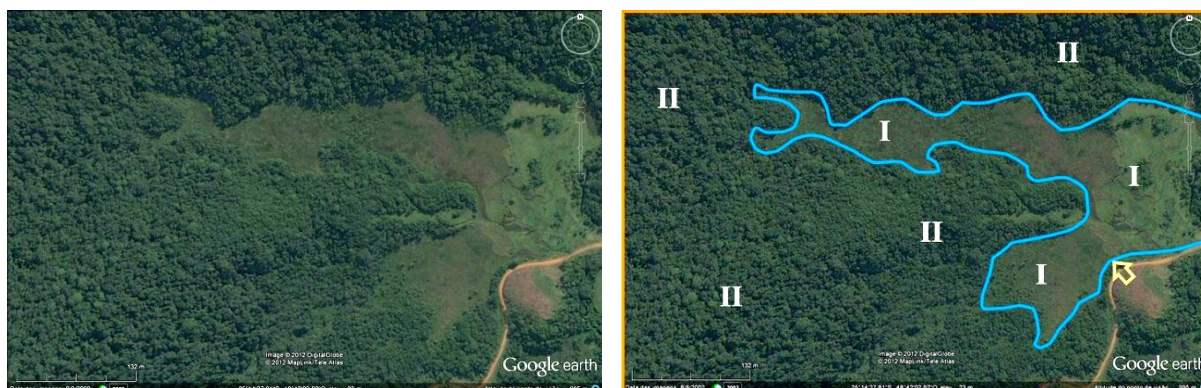


Figura 33 – Compartimentação a partir do Google Earth

O ponto 6 foi o único ponto que não apresentou-se coerente com o mapeamento da pedometria. Este ponto foi coletado em uma porção de terço médio a inferior de encosta, no entanto, foi percebido um declive mais intermediário, o que impossibilitaria o desenvolvimento de características hidromórficas no solo. Todavia, este ponto ficou apenas a um pixel de distância do Grupo 2, portanto mesmo assim esta coleta foi considerada satisfatória, pois nas proximidades (encosta acima) é detectada a presença de pixels do Grupo 3 e 4. Sua cor apresentou tonalidades vermelho-amarelado. Este foi o ponto mais distante da foz do rio Pequeno na qual o acesso se mostrou mais dificultoso, sendo que o ponto foi feito em áreas de vegetação nativa.

O ultimo ponto, realizado às margens do rio do Quebra (afluente do rio Pequeno), é o ponto 7. Este coleta apresentou características de depósitos aluvionares. Sua coloração é cinzento esverdeado, portanto está de acordo com os dois mapeamentos. A Fotografia 7 foi tirada na margem esquerda do rio.



Fotografia 7 – Rio do Quebra

Com relação ao mapeamento de Paula (2010), os quatro pontos amostrados foram coerentes com o mapeamento da Pedometria sendo três deles de solos hidromórficos e um de encosta, na qual foi classificado por ele como associação de Cambissolo Háplico com Latossolo Vermelho-Amarelo (Grupo 2).

Já todos os pontos coletados por Silva (2010), foram encontrados nos dois mapeamentos dentro do Grupo 1. Tal fato pode ser explicado pois o trabalho deste autor é sobre compartimentação e caracterização de feições de depósitos fluviais na qual foram considerados os aspectos fisiográficos e alguns atributos pedológicos. Silva (2010) ainda elaborou um mapa dos depósitos fluviais da bacia do rio Pequeno na escala 1:10.000, reunindo informações fisiográficas, pedológicas e morfogenéticas.

O mapeamento da SPVS, presentes no trabalho de Rocha *et al* (2002), indicam que dos 18 pontos de coleta que foram feitos dentro da bacia hidrográfica do rio Pequeno, 13 são coerentes com o mapeamento da Pedometria. Esta análise foi feita enquadrando as classes dos solos desse trabalho, de acordo com a metodologia empregada nos agrupamentos que foram tanto realizados para Santos *et al.* (2009), quanto para as Unidades Geomórficas geradas por tabulação cruzada. Esse estudo serviu para tomar decisões na hora de estabelecer os quatro Grupos na Pedometria, pois segundo Rocha *et al.* (2002) os Neossolos Litólicos muitas vezes ocorrem associados à Cambissolos Háplicos lépticos nas zonas de vertentes íngremes. Neste caso, a unidade de mapeamento é constituída de uma Associação de Solos representada no mapa pela SPVS pelo símbolo CXbd1+RLd ou seja Cambissolo Háplico + Neossolo Litólico.

Na porção da planície litorânea foi possível identificar as porções que representam os solos rasos da bacia. A classe III representa estes solos (Grupos 3 e 4) e a Fotografia 8 retrata a porção central da bacia.



Fotografia 8 – Compartimentos de porção serrana e planície (Classes I e III)

A Fotografia 9 representa uma visão da porção sudeste da bacia, na qual é possível identificar as três classes (I, II e III).



Fotografia 9 – Vista de todos os compartimentos (Classes I, II e III)

4.3. COMPARAÇÕES ENTRE OS GRUPOS CLASSIFICADAS PELA PEDOMETRIA COM O MAPEAMENTO PREEXISTENTE

Neste item, foram realizadas comparações entre os resultados da Pedometria do item anterior, com o mapeamento de Santos *et al.* (2009). Essas comparações foram feitas segundo os seguintes métodos: Exatidão Global (EG) e Matriz de Erro na qual nos permite avaliar também os erros de inclusão e omissão, bem como a Exatidão do ponto de vista do Produtor (EP) e Usuário (EU).

5.3.1. Exatidão global

Conforme foi descrito no capítulo 4, referente aos Métodos, o parâmetro de comparação Exatidão Global faz uma relação entre a quantidade total de pixels presentes na bacia com os valores que foram corretamente classificados pela Pedometria.

O valor total de pixels da bacia do rio Pequeno é de **1.125.914**, e o de pixels corretamente classificados de acordo com o mapeamento preexistente é de **731.973** (159.453 [1,1] + 427.936 [2,2] + 144.584 [3,3]), portanto:

$$EG = nc/nt$$

$$EG = 731.973 / 1.125.914$$

$$EG = 0,650114485$$

$$EG = \mathbf{0,65}$$

De acordo com esse resultado é possível constatar que a Exatidão Global é de 0,65. Consequentemente pode-se determinar o percentual de concordância (C%) que é de 65% e o percentual de discordância (D%), que é de 35%. A Tabela 10 demonstra uma síntese de todos os parâmetros provenientes da Exatidão Global.

Tabela 10 – Síntese dos resultados provenientes da Exatidão Global

PARÂMETROS DA EXATIDÃO GLOBAL	VALORES
Total de pixels da bacia	1.125.914
Total de pixels corretamente classificados	731.973
EG	0,65
C%	65
D%	35

Legenda: EG= Exatidão Global; C%=Concordância e D%= Discordância

De acordo com esses resultados, foi possível espacializar essas concordâncias e discordâncias entre os dois mapeamentos, conforme a Figura 34. Nela é possível perceber que nas áreas de Planície Aluvial há uma grande concordância

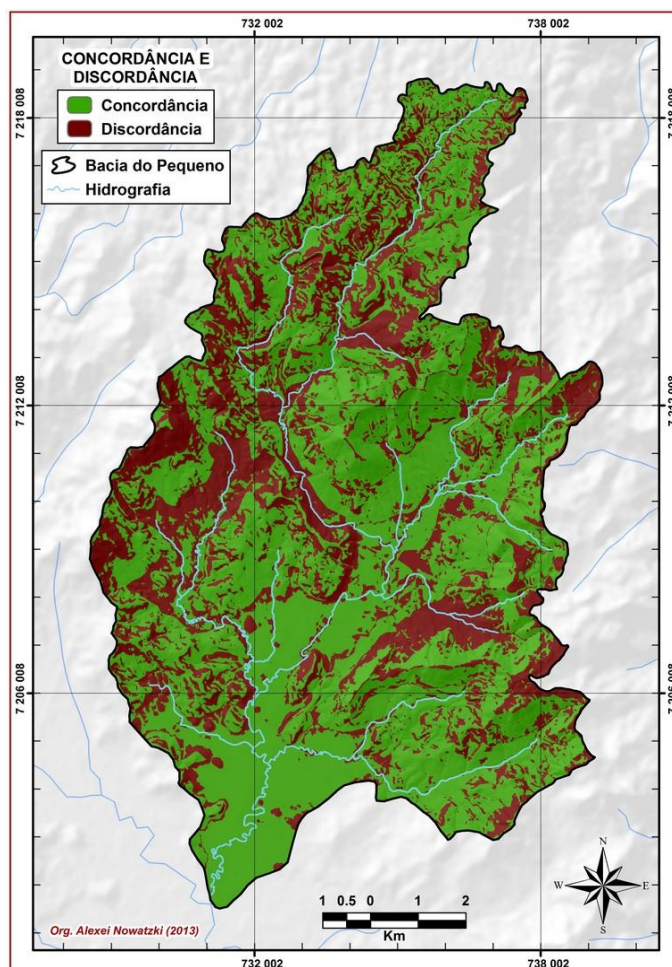


Figura 34 – Áreas de concordância e discordância entre os mapeamentos comparados

4.3.2. Matriz de erro

Primeiramente foram cruzados os Grupos gerados por Pedometria com o mapeamento de Santos *et al.* (2009) por álgebra de mapas, chegando nas seguintes combinações (Quadro 15):

GRUPOS		GRUPOS - PEDOMETRIA		
		1	2	3 e 4
MAPEAMENTO SANTOS <i>et al.</i> (2009)	1	11	21	31
	2	22	21	32
	3	31	32	33

Quadro 15 – Combinações entre os Grupos dos dois mapeamentos

De acordo com essa combinação, foi possível chegar aos resultados da Matriz de Erro, elaborada para comparar os dois mapeamentos. Essa Matriz demonstrou uma maior concordância entre as unidades de mapeamento de Grupos 1, conforme o Quadro 16.

GRUPOS		PEDOMETRIA					
		1	2	3 e 4	Soma parcial	EP	Eom
MAPEAMENTO SANTOS <i>et al.</i> (2009)	1	159.453	90.221	8.054	257.728	61,87%	0,3813
	2	19.943	427.936	186.573	634.452	67,45%	0,3255
	3	1.291	87.859	144.584	233.734	61,86%	0,3814
	Soma parcial	180.687	606.016	339.211	Total de pixels = 1.125.914 Pixels corretamente classificados = 731.973 EG = 0,65		
	EU	88,25%	70,61%	42,62%			
	Ein	0,1175	0,2939	0,5738			

Legenda: EG= Exatidão Global; EU= Exatidão do ponto de vista do Usuário; EP= Exatidão do ponto de vista do Produtor; Ein= Erros de inclusão e Eom= Erros de Omissão

Quadro 16 – Matriz de erros completa comparando os Grupos da Pedometria com o mapeamento de Santos *et al.* (2009)

De acordo com essa Matriz, existem no total 1.125.914 pixels na bacia do rio Pequeno. Desta maneira, 159.453 pixels foram corretamente classificados nos Grupos 1 (SANTOS *et al.*, 2009) com 1 (Pedometria), 427.936 pixels no Grupo 2 com 2 e 144.584 no Grupo 3 com 3. A soma dos pixels corretamente classificados entre os 3 Grupos é de 731.973.

Nessa matriz de erro completa (Quadro 16), foram evidenciados valores satisfatórios da exatidão do ponto de vista do produtor (EP) e de usuário (EU), exceto no Grupo 3 e 4, em relação ao Grupo 3 de Santos *et al.* (2009) na qual o valor do EU chegou a 42,62%.

O grupo que mais teve acerto de EU foi o Grupo 1, com um acerto de 159.453 pixels, dos totais 180.687, chegando assim, aos satisfatórios 88,25%. Estas diferenças de porcentagem podem ser explicadas pela maior precisão do

mapeamento preexistente dos solos de planície, pois os limites dos mesmos são bastante evidentes, do ponto de vista geomorfológico. Desta maneira o conteúdo comparável se torna mais confiável, tendo em vista que para o mapeamento de Neossolos Litólicos ou associações desses com Cambissolos, as técnicas são mais difíceis tendo em vista as dificuldades de coleta por ser locais de difícil acesso.

O valor do EP não foi tão alto para o Grupo 1 como o EU, pois dos 257.728 pixels, 159.453 foram classificados corretamente (61,87%). Acredita-se que houve uma supervalorização desta classe no mapeamento de Santos *et al.* (2009). Tal fato pode ser explicado uma vez que pela avaliação dos atributos topográficos, em algumas áreas na porção leste da bacia, mais precisamente nas proximidades do ponto de coleta 7 (Rio da Quebra), não possui características morfométricas que possibilitam o desenvolvimento de hidromorfia no solo, ou seja, áreas planas e úmidas, muito menos extensas planícies de alagamento que podem gerar solos com características flúvicas (EMBRAPA, 2006). A supervalorização desse mapeamento ainda pode ser entendida em função da escala de mapeamento e na tomada de decisões para determinar o limites das classes de solos, feita pela análise de contexto, explicada mais detalhadamente em Paula e Santos (2008).

Cabe destacar que os valores destas exatidões (Quadro 16) são referentes apenas aos valores das somas de pixels de cada Grupo, em relação aos corretamente classificados. Para uma melhor averiguação da superestimação das classes, foi preciso fazer os cálculos dos erros de Inclusão e Omissão, que induzem ao cálculo da exatidão do ponto de vista do produtor (EP) e de usuário (EU) para cada uma das 9 combinações possíveis sob os dois pontos de vista. O Quadro 17 se refere às análises feitas quando se compara o mapeamento da Pedometria com o de Santos *et al.* (2009). A Figura 35 espacializa os cruzamentos da Matriz de Erro de acordo com a lógica do Quadro 15.

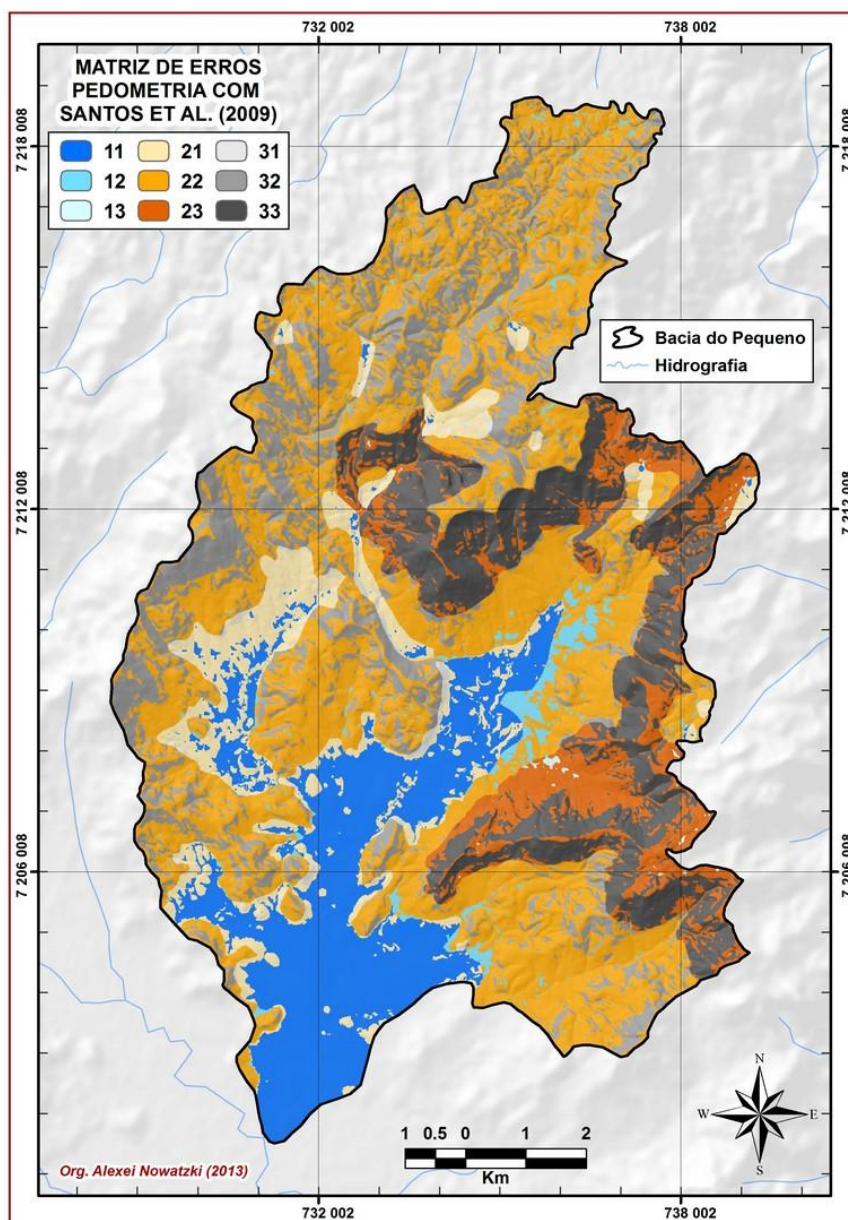


Figura 35 – Espacialização das combinações resultantes pela Matriz de Erro

GRUPOS		GRUPOS - PEDOMETRIA		
		1	2	3 e 4
MAPEAMENTO SANTOS et al. (2009)	1	88,25%	14,89%	2,37%
	2	11,04%	70,61%	55,00%
	3	0,71%	14,50%	42,62%
	Soma parcial	100,00%	100,00%	100,00%

Quadro 17 – Exatidão do ponto de vista do Usuário

Conforme foi descrito, o EU do Grupo 1 com 1 (combinação 11) teve uma excelente correlação (88,25%), pois que de acordo com o Quadro 16 os pixels incorretamente classificados, pertencem praticamente todos ao Grupo 2. Estas combinações se concentram na porção oeste, em uma zona de transição entre a planície das áreas coluviais, conforme é possível constatar pela Figura 35. Ainda sobra um equivalente de menos de 1% de classificação do Grupo 1 no 3, que seriam porções de solos hidromórfico com solos rasos. O mesmo ocorre de acordo com a combinação 31, com apenas 2,37% de concordância.

O acerto do Grupo 2 foi de 70,61%, podendo ser considerado satisfatório pois os erros estão apontados com aproximados 15% tanto para o Grupo 1 quanto para o 3. Com relação à combinação 21, estas são as áreas que já foram mencionadas por ocupar uma porção da bacia do rio do Quebra, que são áreas de transição planície/encosta e algumas faixas isoladas no centro e na porção norte da bacia (Figura 35). De acordo com essa mesma figura, a combinação 23 ocorre nas porções onde em Pedometria são encontrados os Cambissolos (Grupo 2), porém de acordo com o mapeamento preexistente, estas porções se encaixam na classe de solos rasos apenas. Nota-se uma concentração na porção leste e centro-norte da bacia.

Para o Grupo 3, podemos notar que foi a pior concordância (em relação a 11 e 22), com um EU de 42,62% para a combinação 33. A combinação 32 apresentou que 55% dos pixels do Grupo 3, encontraram-se sobrepostos pelos do Grupo 2. Estes valores díspares são explicados principalmente pela ausência de coletas na porção oeste, noroeste e norte da bacia, onde as chances de serem encontrados solos rasos são muito grandes, vide os resultados dos atributos topográficos selecionados para a realização da Tabulação Cruzada. Na porção oeste da bacia do rio Pequeno, próximo dos seus divisores, encontram-se áreas escarpadas, de acordo com a Clinografia, o que evidencia essa tendência de possuir solos rasos, como os Neossolos Litólicos.

O Quadro 18 apresenta os resultados da Exatidão do ponto de vista do Produtor, comparando agora o mapeamento de Santos *et al.* (2009) com da Pedometria.

GRUPOS		GRUPOS - PEDOMETRIA			
		1	2	3 e 4	Soma parcial
MAPEAMENTO SANTOS et al. (2009)	1	61,87%	35,01%	3,13%	100,00%
	2	3,14%	67,45%	29,41%	100,00%
	3	0,55%	37,59%	61,86%	100,00%

Quadro 18 – Exatidão do ponto de vista do Produtor

Algumas conclusões podem ser tiradas por esses dois parâmetros, que complementam os dois anteriores. Nota-se que sob o ponto de vista do mapeamento preexistente, as combinações 11, 22 e 33 ficaram próximas do valor de concordância de 65% (oriundo do resultado da EG = 0,65).

Como houve uma supervalorização do Grupo 1 por parte deste mapeamento, uma grande parte dos pixels do Grupo 2 da Pedometria se enquadrou na combinação 21, atingindo o valor de 35,01% de EP. Este fato pode ser observado ainda na combinação 12, na qual obteve-se um valor de EP de apenas 3,14%. Para as combinações 23 e 32, os valores ficaram em torno dos 30%, na qual evidenciam as disparidades entre os limites de Cambissolos como solos mais rasos. Para as combinações 13 e 31, foram obtidos os valores de 0,55% e 3,13% respectivamente o que indica a coerência do mapeamento de Pedometria, pois houve um pequeno erro de áreas úmidas sobre áreas montanhosas/escarpadas.

Para finalizar este capítulo, a Figura 36 tem o efeito visual final da comparação espacial entre os dois mapeamentos analisados, bem como uma espacialidade dos pixels de discordância e as concordâncias discriminadas pelos Grupos 1, 2 e 3 (por exemplo, onde aparece em azul, quer dizer que os pixels dos dois mapeamentos pertencem ao Grupo 1).

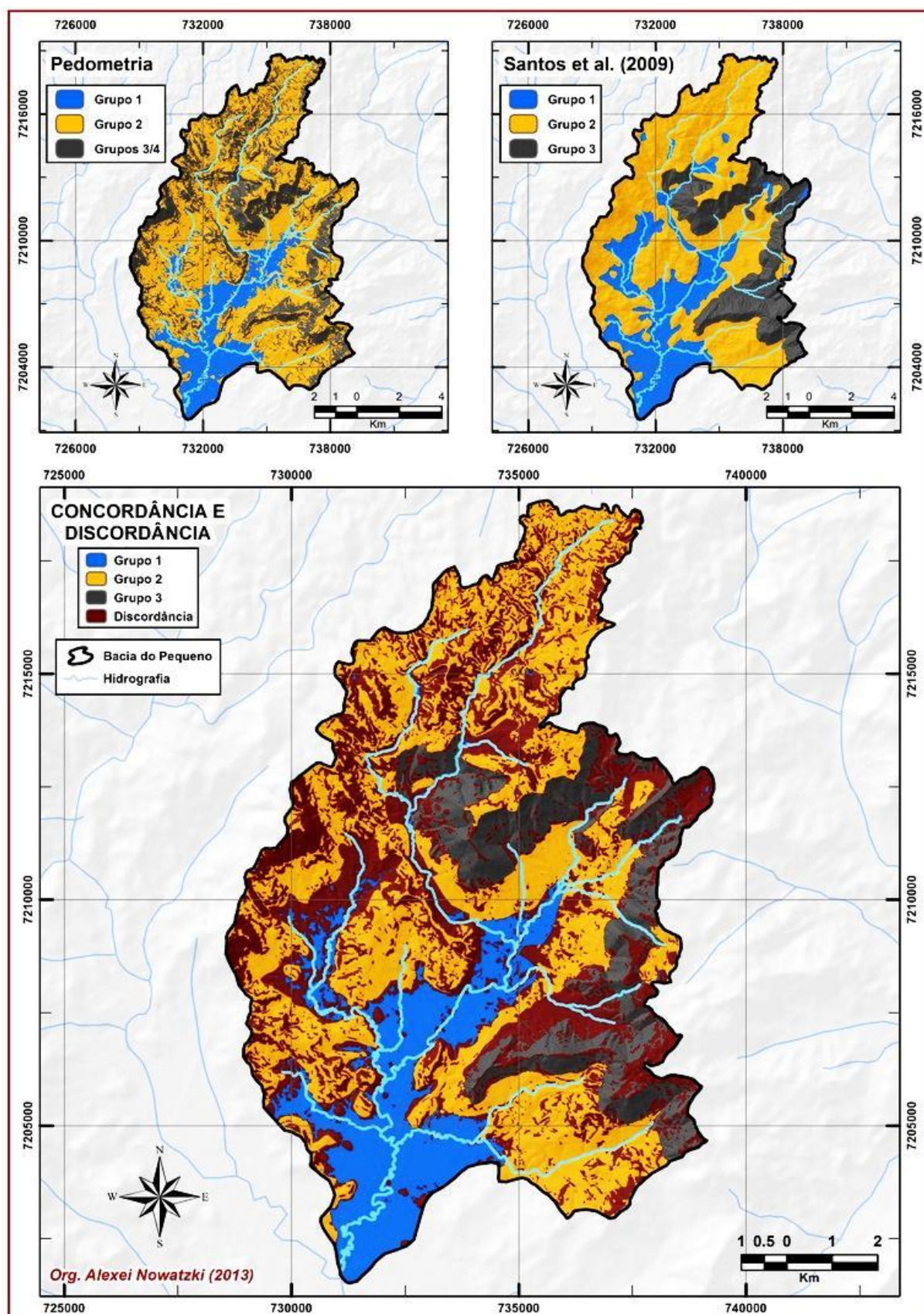


Figura 36 – Distinção entre as concordâncias e discordâncias entre os Grupos do mapeamento de Santos et al. (2009) e os Grupos gerados pela Pedometria

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos atributos topográficos, bem como a sua discretização em classes, foi essencial no entendimento das relações do relevo com a distribuição dos solos na paisagem da bacia do rio Pequeno. A relação entre esses atributos possibilitou realizar agrupamentos que resultaram em grupos de Unidades Geomórficas.

Os atributos: Topográfico de Umidade, Corrente de Máximo Fluxo, Capacidade de Transporte de Sedimentos e Clinografia tiveram uma melhor relação com os tipos de solos encontrados em regiões de planícies aluviais, como os solos hidromórficos e de Serra do Mar, como Cambissolos e Neossolos Litólicos.

A qualidade do MDT da bacia do rio Pequeno foi fundamental para o êxito do trabalho, pois as curvas com equidistância de 10m puderam construir um modelo geomorfológico mais fiel à realidade, o que resultou numa distribuição coerente dos Grupos gerados por Tabulação Cruzada.

A escala do mapa preexistente (SANTOS *et al.* 2009) é do tipo semidetalhado, o que faz com que os limites de alguns solos sejam mais generalizados. Com as operações de Tabulação Cruzada é possível contribuir para estabelecer limites mais próximos da realidade, compatível com a escala do mapeamento preexistente.

O trabalho de campo foi essencial para entender a paisagem local, bem como visualizar os limites entre os compartimentos pedológicos. Foi possível também comparar as coletas com as classes de Pedometria, que se mostrou coerente com esse trabalho de campo, bem como os outros trabalhos consultados.

Os difíceis acessos às áreas montanhosas e escarpadas da bacia impediram uma validação em campo dos Grupos 3 e 4 de Pedometria. Contudo, o mapeamento realizado por Rocha *et al.* (2002) contribuiu na divisão em quatro Grupos de Unidades Geomórficas. Esses autores destacaram que na região em estudo, existem associações de Cambissolos e Neossolos Litólicos (Grupo 3, no mapeamento de Pedometria) que ocorrem de acordo com as mudanças no perfil topográfico da vertente.

Os resultados obtidos por Tabulação Cruzada se mostraram satisfatórios, pois houve uma concordância de 65% entre o mapa predito por Pedometria com o mapeamento de Santos *et al.* (2009).

A espacialização por Pedometria dos Grupos 3 e 4 na porção oeste da bacia veio suprir uma carência de informações presentes no mapeamento preexistente, pois nessa região, existem apenas Cambissolos (Grupo 2). No entanto, os atributos topográficos apontaram que seria impossível a existência de solos mesmo pouco desenvolvidos, por existir valores desses índices muito extremos, como no caso da Clinografia que apontou algumas áreas escarpadas.

O Grupo 1 da Pedometria foi o que teve uma melhor concordância com o Grupo 1 do mapeamento preexistente, pois seus limites são melhor identificáveis no mapeamento preexistente, sendo que pela Exatidão do ponto de vista do Usuário, o valor chegou aos 88%.

De acordo com o mapeamento preexistente, existem solos mais evoluídos, do ponto de vista pedogenético, como Latossolos e Argissolos associados com Cambissolos. Entretanto, com os atributos topográficos, não foi possível identificar nenhuma característica topográfica que pudesse indicar áreas onde esses solos pudessem ocorrer na bacia. Por esse motivo não foi criado um grupo de “solos evoluídos” para comparação, sendo que os mesmos foram incluídos no Grupo 2.

O método da Tabulação Cruzada, se mostrou eficiente na espacialização de Unidades Geomórficas, pois com a álgebra de mapas foi possível prever ambientes em que pudessem ocorrer diferentes tipos de solos e contribuir para uma melhor espacialização de alguns tipos de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEMADAN (Associação de Defesa do Meio Ambiente e do Desenvolvimento de Antonina), **RAPPs (Recuperação de áreas degradadas em APPs por meio de adubação verde e plantio de mudas de espécies nativas produzidas em viveiro comunitário na Bacia do Rio Pequeno –Antonina-PR)**, 2012. Disponível em: <<http://rapps.ademadan.org.br/>> Acesso em: 06 mai. 2012.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; MATOS, D. J.; WERNER, A. **A Serra do Mar e a Porção Oriental do Estado do Paraná**. Curitiba: ADEA/Sec. Est. Planejamento/PR, 1978.

BONISCH, S.; ASSAD, M. L. Lopes; MONTEIRO, A. M. V.; CAMARA, G.. Representação e propagação de incertezas em dados de solo: II - Atributos numéricos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. 2004, vol.28, n.1 [cited 2013-05-06], pp. 33-47 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000100004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 fev. 2013.

CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos de pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, 2006.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná : Curitiba, 2003. 210p.

CHAGAS, A. P. **Argilas: as essências da terra**. (Coleção Polêmica) 1. ed. São Paulo, Editora Moderna, 1996.

CHAGAS, C. S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. 2006. 223p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

COELHO, F. F. **Comparação de métodos de mapeamento digital de solos através de variáveis geomorfométricas e sistemas de informações geográficas**. Porto Alegre, 2010, 80 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Programa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Centro estadual de pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COELHO, F. F.; GIASSON, E. **Métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica**. Revista Ciência Rural, Santa Maria, v.40, n.10. Outubro, 2010.

CORREIA, M. S. **Utilização de detecção remota para a monitorização temporal do uso do solo no estuário do Tejo**. Évora, 2003, 100 f. Dissertação (Mestrado em Gestão dos Recursos Biológicos) Universidade de Évora, Portugal

CRIVELENTI, R.C., COELHO R.M., ADAMI S.F., OLIVEIRA, S.R.M. **Mineração de dados para inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.44, n.12, p. 1707-1715, 2009.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Mapa de levantamento e reconhecimento dos solos do estado do Paraná**. Curitiba: IAPAR/ EMBRAPA/ SUDESUL. 1984. Escala 1:600.000

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná). **Carta de Solos do Estado do Paraná**: EMBRAPA e IAPAR. 2008. Escala 1:250.000.

ESPINDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a pedologia**, Um repasse bibliográfico, Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

ESPINDOLA, C. R. A pedologia e a evolução das paisagens. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, 31 (1/2), 67-92, 2010.

ESRI. **ArcGis 9.3.1., Spatial Analyst, 3D Analyst**. Environmental Systems Research Institute, 2009.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Noções básicas de Cartografia**. Departamento de Cartografia, Rio de Janeiro, 1998.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual de Técnico de Pedologia**. Série Manuais Técnicos em Geociências. n. 4. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

GONZALEZ J. P.; JARVIS, A.; COOK, S. E.; OBERTHUR, T.; RINCON-ROMERO, M. BAGNELL, J. A. DIAS, M. B. **Digital Soil Mapping of Soil Properties in Honduras Using Readily Available Biophysical Datasets and Gaussian Processes** In: Digital Soil Mapping with Limited Data, A.E. Hartemink et al. (eds.). Springer Science+Business Media B.V. 2008

HUDSON, B. D. The soil survey as a paradigm-based science. **Journal Soil Science Society of America**, v.56, p.836-841, 1992.

IPARDES (Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social) / Fundação Edison Vieira. **Zoneamento do Litoral Paranaense**. Curitiba, 1989. Convênio SEPL (Secretaria de Estado do Planejamento e Coordenação Geral) /IPARDES. 175p.

IPPOLITI, G. A.; Costa, L. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FILHO, E. I. F.; GAGGERO, M. R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de "Mar de Morros" (MG). **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, Apr. 2005.

Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832005000200012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 fev. 2013.

IRVIN, B. J.; VENTURA, S. J.; SLATER, B.K. Fuzzy and Isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant alley. **Geoderma**, v.77, p. 137-154, 1997

JARENTCHUK JR., O. **Diagnóstico morfodinâmico para a delimitação de áreas prioritárias à recuperação e conservação ambiental na bacia hidrográfica do rio Cachoeira – Antonina/PR**. Monografia (Conclusão do curso de Bacharel em Geografia) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O. Relações pedomorfogeológicas e distribuição de pedoformas na estação ecológica de águas emendadas, Distrito Federal. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, June 2012. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000300003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 2 fev 2013.

LAGACHERIE P. **Digital Soil Mapping: A State of the Art**. In: Digital Soil Mapping with Limited Data, A.E. Hartemink et al. (eds.). Springer Science+Business Media B.V. 2008.

LARACH, J. O. I. **Bases para leitura de mapas de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/SNLCS, 1981. 91 p. (SNLCS. Série miscelânea, 4).

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LEPSCH, I. F. **19 lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

MAACK, R. R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Ed. Olympio, 1981.

MASSAD, E.; MENEZES, R. X.; SILVEIRA, P. S. P.; ORTEGA, N. R. S. **Métodos quantitativos em Medicina**. Ed. Manole. Barueri, São Paulo, 2004.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, v. 97, n. 3-4, p.293-327, 2000.

McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.

MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A). **Atlas geológico do Estado do Paraná**. 2001. Disponível em:

<<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf>>. Acesso em: 14 mai. 2012.

MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A). **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**. 2006. Disponível em:

<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/Geomorfologicos/atlas_geomorforlogico.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2012.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society American Journal**. v. 57, p. 443-452, 1993.

MOREIRA, A. A.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; RIBEIRO, C. A. A. S. **Utilização de algoritmos de classificação para o mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, a partir de uma imagem do sensor IKONOS II**. XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada - A Geografia Física Aplicada e as dinâmicas de apropriação da natureza, Viçosa (MG), 2009.

MUNSELL COLOR COMPANY. **Munsell soil color charts**, 2000.

NETO, P.V. **Estatística descritiva: Conceitos básicos**. São Paulo. 2004.

PAULA, E. V. **Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina/PR uma abordagem geopedológica**. Curitiba, 2010, 158 f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

PAULA, E. V. & SANTOS, L. J. C. **Confecção da Carta de Pedologia (1:50.000) da Área de Drenagem da Baía de Antonina (Etapa 3 – Relatório Final)**. Antonina: ADEMADAN, 2008. 161 p. Relatório Técnico Terminais Portuários Ponta do Felix.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Programa Floresta Atlântica. **Mapeamento da Floresta Atlântica do Estado do Paraná**. Relatório final. Curitiba, 2002.

QUEIROZ NETO, J. P. **Geomorfologia e Pedologia**. Revista Brasileira de Geomorfologia. Vol. 1 p.59-67. São Paulo, 2000.

QUEIROZ NETO, J. P. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. **Revista Brasileira de Geomorfologia** - v. 12, nº 3, 2011.

ROCHA, C. H. B. Geoprocessamento Tecnologia Transdisciplinar. Cap. 9 – **Modelo Digital do Terreno**. Minas Gerais: Ed. Do Autor, 2000.

ROCHA, H. O.; CARDOSO, A.; SCHMIDLIN, D.; ROCHA, A. J. **Levantamento de Solos: Reserva Natural do Rio Cachoeira**. Curitiba: Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental/ The Nature Conservancy. 2002.

ROSSITER, D. G. **Digital Soil Mapping as a Component of Data Renewal for Areas with Sparse Soil Data Infrastructures** In: Digital Soil Mapping with Limited Data, A.E. Hartemink et al. (eds.). Springer Science+Business Media B.V. 2008

SAGA, **System for Automated Geoscientific Analyses**. SAGA Graphical User Interface Version: 2.0.5. SAGA Application Programming Interface - Version: 2.0.5, 1999.

SALGADO, C. M. Pedogeomorfologia: uma nova disciplina para a análise ambiental **Revista Tamoios**, Ano I, nº 2, 2005.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SANTOS, L. J. C.; PAULA, E. V.; GROCHOCKI, M. A. F. Mapeamento geomorfológico como subsídio à identificação e à estimativa dos solos na área de drenagem da baía de Antonina (PR) **Revista Brasileira de Geomorfologia** - v. 10, nº 2 (2009)

SCHELLING, J. Soil genesis, soil classification and soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 4, p. 165-193, 1970. Disponível em:
< <ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Gypsum/publications/Schilling.pdf> > Acesso em: 23 Abr. 2012.

SILVA, J. M. F. **Caracterização e mapeamento das unidades geomorfológicas da Bacia do Rio Pequeno, Antonina - PR**. Curitiba, 2010, 95 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: Integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e redes neurais artificiais**. Curitiba, 2010, 153 f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SILVEIRA, C. T. OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. V.; SILVA, C. R. **Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas**. Revista Brasileira de Geomorfologia. Vol. 13, nº 2. 2012.

SILVEIRA, C. T. OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. V.; SILVA, C. R.; BOTELHO, M. F. Soil prediction using artificial neural networks and topographic attributes. **Geoderma** Vol. 172. 165–172, 2013.

SIRTOLI, A. V. **Mapeamento de Solos Com Auxílio da Geologia, Atributos do Terreno e Índices Espectrais Integrados Por Redes Neurais Artificiais**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008. 114f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia agraria**, v.9, n.3, p.317-329, 2008a.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; C. T.; SILVA, C. R.; RIBEIRO, S. R. A. OKA-FIORI, C. Atributos topográficos secundários no mapeamento de pedoformas. **Geociências**, v.21, n.1, p.63-77, 2008b.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF. **Soil survey manual**. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18, 1993.

STEERING COMMITTEE FOR FRONTIERS IN SOIL SCIENCE RESEARCH; NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Frontiers in Soil Science Research: Report of a Workshop**. The National Academies Press, 2009. Disponível em: < http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12666#toc > Acesso em: 03 mai. 2012.

STRAHLER, A.N. Hypsometric analysis of erosional topography. **Geol. Soc. America Bulletin**, 63, 1952, p. 1117-1142.

TEN CATEN, A. **Aplicação de componentes principais e regressões logísticas múltiplas em sistema de informações geográficas para a predição e o mapeamento digital de solos**. Santa Maria, 2008, 120 f. Dissertação (Mestrado em Centro de Ciências Rurais) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E.; PEREIRA, R. S. **Pedometria aplicada à predição de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7685-7692. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.00.19>>. Acesso em: 14 ago. 2012.

TOMLIN, C. D. **A Map Algebra**. In Proceedings of Harvard Computer Graphics Conference, at Cambridge, Mass, 1983

VALLADARES, G. S.; HOTT, M.C. **The Use of GIS and Digital Elevation Model in Digital Soil Mapping – A Case Study from São Paulo, Brazil**. In: Digital Soil Mapping with Limited Data, A.E. Hartemink et al. (eds.). Springer Science+Business Media B.V. 2008

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.3, p.539-546, 2003.

VALERIANO, M. M e CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.4, n.1, p.17-29, 2003

VEZZANI, F.M. & MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba: Fabiane Machado Vezzani & João Mielniczuk, 2011. 104p.